



TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN SIMULASI TOPOLOGI *MULTILEVEL*
INVERTER MULTISTRING UNTUK PEMBANGKIT ENERGI
TERBARUKAN TERDISTRIBUSI**

DAMASTYA PRAYOGO
NRP 2211105064

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT -TE 141599

**DESIGN AND SIMULATION TOPOLOGY MULTILEVEL
INVERTER MULTISTRING FOR DITRIBUTED ENERGY
RESOURCES**

DAMASTYA PRAYOGO
NRP 2211 105 064

Counsellor Lecturer
Prof. Dr. Ir. MochamadAshari, M.Eng.
HeriSuryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

**DESAIN DAN SIMULASI TOPOLOGI MULTILEVEL
INVERTER MULTISTRING UNTUK PEMBANGKIT
ENERGI TERBARUKAN TERDISTRIBUSI**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng.
NIP. 196310121990031003

Heri Suryatmojo, ST., MT., Ph.D.
NIP. 198006032006041003

**SURABAYA
JULI, 2015**

Desain dan Simulasi Topologi *Multilevel Inverter Multistring* untuk Pembangkit Energi Terbarukan Terdistribusi

Nama Mahasiswa : Damastya Prayogo
NRP : 2211 105 064
Dosen Pembimbing : 1. Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng.
2. Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
NIP : 1. 1965 10 12 1990 03 1003
2. 1980 06 03 2006 04 1003

Abstrak

Multilevel Inverter merupakan jenis dc-ac *inverter* yang dapat menaikkan dan menurunkan tegangan *output*. Prinsip kerja *multilevel inverter multistring* ini sama dengan *multilevel inverter* konvensional akan tetapi memiliki keuntungan yaitu output tegangan yang lebih baik, penyearangan yang lebih kecil, mengurangi gangguan elektromagnetik, dan THD (total Harmonic Distortion).

Pada tugas akhir ini dibahas desain dan simulasi *multilevel inverter multistring* dengan menggunakan 6 *switch*. Simulasi yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah penerapan *multilevel* yang diberi beban statis (resistif) dan sumber bervariasi seperti *Photovoltaic* (PV) dan Baterai *bidirectional*. dari hasil simulasi diamati karakteristik tegangan *output* pada *multilevel inverter multistring* tersebut sehingga dapat ditentukan keuntungan menggunakan rangkaian tersebut.

Kata Kunci : *Multilevel Inverter, Photovoltaic*

Halaman ini sengaja dikosongkan

Design and Simulation Topology Multilevel Inverter Multistring For Distributed Energy Resources

Name of Student: Damastya Prayogo

NRP : 2211 105 064

Counsellor 1 : Prof. Dr. Ir.Mochamad Ashari, M.Eng

Counsellor 2 : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

ABSTRACT

Multilevel Inverter is a dc-ac inverter which can increase the output voltage.the principal of this multilevel inverter same as multilevel inverter conventional. However, it has an advantage in which its output voltage ratio is higher, filter minimalize, reduce harmonic distortion..

At this final project, design and simulation of the multilevel inverter with six transistor. This final project's simulation is an application of the multilevel inverter with static load (resistif) sources equipped with photovoltaic (PV) and battery bidirectional. The output voltage's characteristic of those inverter are observed from the simulation. Hence, it can be determined type of multilevel inverter are more advantage.

keywords : multilevel inverter,photovoltaic

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji sukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul :

DESAIN DAN SIMULASI TOPOLOGI MULTILEVEL INVERTER MULTISTRING UNTUK PEMBANGKIT ENERGI TERBARUKAN TERDISTRIBUSI

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Keluarga yang telah banyak memberikan dorongan dan doa untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak **Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng** dan Bapak **Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.**, selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingan.
3. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST, MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS, serta Bapak Ir. Teguh Yuwono selaku Koordinator Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga.
4. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah banyak memberi ilmu selama penulis menempuh kuliah.
5. Rekan-rekan mahasiswa Jurusan Teknik Elektro ITS Lintas Jalur, yang telah memberikan doa dan semangat.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini belum sempurna, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga buku Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, Juni 2015

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang	1
1.2	Tujuan	2
1.3	Perumusan masalah	3
1.4	Batasan masalah	3
1.5	Metodologi	4
	1.5.1 Pengumpulan Data dan Studi Literatur	5
	1.5.2 Mendesain rangkaian <i>control photovoltaic</i> (PV)	5
	1.5.3 Menyusun Desain rangkaian control baterai SEPIC- bidirectional	5
	1.5.4 Menyusun rangkaian <i>multilevel inverter</i>	5
	1.5.5 Simulasi, Analisis dan Implementasi	5
	1.5.6 Pembuatan Laporan Tugas Akhir	6
1.6	Sistematika Penulisan	6
	BAB I : Pendahuluan	6
	BAB II : Teori Penunjang	6
	BAB III : Perencanaan	6
	BAB IV : Simulasi Sistem dan Analisa data	6
	BAB V : Kesimpulan dan saran	7
1.7	Tinjauan pustaka	7

BAB 2 TEORI PENUNJANG

2.1	<i>Photovoltaic</i> (PV)	9
	2.1.1 Karakteristik arus-tegangan <i>photovoltaic</i> (PV)	14
	2.1.2 <i>Fill Factor</i> (FF)	15
	2.1.3 Efek suhu dan <i>irradiant</i>	15

2.1.4 <i>Maximum Power point Tracking</i> (MPPT) P&O.	19
2.2 <i>Baterai</i>	22
2.3 SEPIC- <i>bidirectional</i> konverter.....	24
2.3.1 <i>Single Ended Primary Inductor Converter</i> (SEPIC) .	26
2.3.2 <i>Bidirectional</i> konverter.....	31
2.3.3 Mode operasi sistem.....	36
2.4 Multilevel Inverter	37

BAB 3 Perencanaan

3.1 Pemodelan Sistem	41
3.2 Pemodelan <i>photovoltaic</i> (PV)	42
3.2.1 Desain control MPPT	44
3.3 Desain SEPIC- <i>bidirectional</i> Konverter.....	45
3.3.1 Perhitungan parameter SEPIC	45
3.3.2 Perhitungan parameter <i>bidirectional</i> converter	47
3.3.3 Desain kontrol <i>Bidirectional</i>	47
3.3.4 Desain kontrol <i>Duty Cycle</i>	48
3.3.5 Desain kontrol <i>DC-Link</i>	49
3.4 Desain Pemodelan Baterai	50
3.5 Desain <i>Multilevel Inveter</i>	52

BAB 4 SIMULASI SISTEM DAN ANALISIS DATA

4.1 Simulasi kinerja MPPT	55
4.1.1 Kinerja MPPT dengan variasi Intensitas cahaya matahari.....	55
4.1.2 Kinerja MPPT dengan variasi beban	56
4.2 Desain Baterai <i>bidirectional</i> SEPIC-konverter.....	57
4.3 Simulasi sistem saat kondisi statis	58
4.3.1 Daya beban melebihi daya PV	59
4.3.2 Daya beban dibawah daya PV	60
4.3.2.1 SOC Baterai 50%	60
4.3.2.1 SOC Baterai 99,9%	61
4.4 Simulasi pada beban Transient.....	62
4.4.1 Variasi intensitas cahaya dengan beban konstan	62
4.4.2 Variasi kebutuhan Daya beban dengan intensitas cahaya konstan	64
4.5 Modifikasi rangkaian Multilevel Inverter 6 <i>Switch</i>	66

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran	70

DAFTAR PUSTAKA	71
-----------------------------	-----------

DAFTAR RIWAYAT HIDUP	73
-----------------------------------	-----------

LAMPIRAN	75
-----------------------	-----------

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Operasi <i>multistring input SEPIC – bidirectional converter</i>	36
Tabel 2.2	Switching <i>multilevel inverter</i>	38
Tabel 3.1	spesifikasi tegangan pada sistem	41
Tabel 3.2	Parameter <i>Photovoltaic</i> (PV) Mistsubishi PV-MLU250HC	42
Tabel 3.3	Parameter <i>photovoltaic</i> (PV) dipasng secara seri	44
Tabel 3.4	Spesifikasi parameter baterai yang digunakan.....	50
Tabel 4.1	Data variabel beban	56
Tabel 4.2	Spesifikasi parameter baterai yang digunakan.....	57
Tabel 4.3	Perbandingan variasi beban dan SOC.....	58
Tabel 4.4	Aliran daya pada sistem saat kondisi Pbeban>Ppv dan intensitas cahaya 800 w/m ²	60
Tabel 4.5	Aliran daya pada sistem saat kondisi Pbeban>Ppv dan intensitas cahaya 500 w/m ²	60
Tabel 4.6	Aliran daya pada sistem saat kondisi Pbeban<Ppv dan intensitas cahaya 1000 w/m ² dengan SOC 50% dan 99,9%	61
Tabel 4.7	Daya PV, Baterai dan beban pada intensitas cahaya yang bervariasi	63
Tabel 4.8	Besar aliran daya pada kondisi beban bervariasi	65

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Metodologi Pengujian.....	4
Gambar 2.1	Jenis-jenis sistem PV <i>Stand alone</i>	11
Gambar 2.2	Rangkaian ekivalen sederhana <i>Photovoltaic</i> (PV).....	12
Gambar 2.3	Rangkaian ekivalen <i>Photovoltaic</i> (PV).....	12
Gambar 2.4	<i>Photovoltaic</i> (PV) dihubungkan seri (a) paralel (b)....	13
Gambar 2.5	Grafik V-I dan V-P pada <i>Photovoltaic</i> (PV)	14
Gambar 2.6	Kurva V-I dengan perubahan <i>irradiant</i>	17
Gambar 2.7	Kurva V-P dengan perubahan <i>irradiant</i>	17
Gambar 2.8	Kurva V-I <i>Photovoltaic</i> (PV) dengan perubahan suhu matahari	18
Gambar 2.9	Kurva V-P <i>Photovoltaic</i> (PV) dengan perubahan suhu matahari	18
Gambar 2.10	Kurva titik kerja <i>photovoltaic</i> (PV) akibat perubahan beban	20
Gambar 2.11	flowchart dari algoritma P&O	21
Gambar 2.12	Pemodeln rangkaian baterai	23
Gambar 2.13	Kurva karakteristik <i>Discharge</i> Baterai (V-Q)	23
Gambar 2.14	Topologi dual input SEPIC-bidirectional converter ...	25
Gambar 2.15	Aliran daya pada dual input bidirectional converter ...	25
Gambar 2.16	Rangkaian SEPIC	26
Gambar 2.17	Bentuk tegangan dan arus inductor L1 dan L2	30
Gambar 2.18	Rangkaian <i>bidirectional converter</i>	31
Gambar 2.19	Operasi kerja <i>Bidirectional converter</i>	32
Gambar 2.20	Bentuk tegangan dan arus induktor L3	35
Gambar 2.21	Rangkaian Multilevel Inverter.....	38
Gambar 3.1	Konfigurasi Sistem Keseluruhan	41
Gambar 3.2	Blok Diagram PV Array	43
Gambar 3.3	Karakteristik kurva PV	43
Gambar 3.4	Sistem kontrol dual inputs <i>Bidirectional converter</i>	48
Gambar 3.5	Kontrol Duty Cycle..	49
Gambar 3.6	Pensaklaran SEPIC <i>converter</i>	49
Gambar 3.7	Rangkaian kontrol DC-Link..	50
Gambar 3.8	Kurva karakteristik Baterai.....	51
Gambar 3.9	SOC Baterai saat (a) <i>charging</i> dan (b) <i>discharging</i>	52
Gambar 4.1	Kurva Pmax dengan Ppv dengan variasi beban.....	56

Gambar 4.2	Perbandingan tanpa MPPT dan menggunakan MPPT..	56
Gambar 4.3	Karakteristik pemodelan baterai pada MATLAB	58
Gambar 4.4	Ilustrasi aliran daya pada masing-masing kondisi	59
Gambar 4.5	Bentuk tegangan dan SOC baterai saat kondisi Pbeban<Ppv dan SOC baterai 50%	61
Gambar 4.6	Bentuk tegangan dan SOC baterai saat kondisi Pbeban<Ppv dan SOC baterai 99,99%	61
Gambar 4.7	Aliran daya pada sistem saat kondisi intensitas cahaya bervariasi..	63
Gambar 4.8	Bentuk tegangan dan SOC baterai saat kondisi intensitas cahaya bervariasi	63
Gambar 4.9	Bentuk tegangan dan arus beban saat kondisi intensitas cahaya bervariasi	64
Gambar 4.10	Aliran daya pada sistem saat kondisi beban bervariasi..	65
Gambar 4.11	Bentuk tegangan dan SOC baterai saat kondisi beban bervariasi..	65
Gambar 4.12	Bentuk tegangan dan arus beban saat kondisi beban bervariasi..	66
Gambar 4.13	Desain CCHB Inverter	67
Gambar 4.14	Desain <i>Multilevel Inverter</i>	67
Gambar 4.15	<i>Output Multilevel Inverter</i>	68

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam Era Globalisasi, seluruh belahan dunia sedang berkonsentrasi terhadap *Global Warming* dan perubahan iklim secara ekstrim, fokus saat ini terlebih untuk mengembangkan Sumber Daya Energi Terdistribusi yang ramah lingkungan. Untuk penyaluran daya listrik dengan efisiensi tinggi, kehandalan tinggi, dan kualitas daya yang baik, Sumber daya energi Terdistribusi (DER) dengan menggunakan *Photovoltaic* (PV), dan baterai saat ini menjadi perhatian yang serius. Pada umumnya, DER di *supply* menggunakan tegangan searah (DC), untuk berbagai macam kondisi beban.

Oleh karena itu, sistem konversi *photovoltaic* (PV) menjadi energi listrik telah menjadi teknologi industri dengan pertumbuhan yang pesat di berbagai negara. Sistem konversi yang telah dikembangkan adalah sistem *grid-connected* untuk mengurangi pemakaian daya dari jala-jala dan sistem *stand-alone* untuk menyediakan daya ke beban tanpa jala-jala.

Sistem *photovoltaic* (PV) *stand-alone* digunakan ketika beban atau konsumen tidak dapat dijangkau oleh saluran distribusi contohnya pada pulau terpencil. Penggunaan sistem ini membutuhkan baterai yang berfungsi untuk menyuplai daya beban selama periode tanpa atau kekurangan daya dari *photovoltaic* (PV).

Masalah yang sering timbul pada adalah besar nilai tegangan baterai lebih kecil dibandingkan dengan tegangan pada beban. Untuk mengatasi masalah ini, maka digunakan DC-DC *converter boost* untuk menaikkan tegangan output baterai, selain itu baterai harus dapat berfungsi untuk menyimpan kelebihan daya *photovoltaic* (PV) sehingga konverter yang digunakan harus dapat bekerja dalam dua arah. Baterai mempunyai kerapatan penyimpanan energi yang tinggi, namun proses *charging* dengan periode yang pendek dapat berakibat buruk pada baterai [1]. Hal ini juga menjadi suatu masalah di dalam sistem *photovoltaic* (PV) *stand-alone*. Oleh karena itu, pengaturan *charging*

dan *discharging* dari baterai dengan mempertimbangkan variasi radiasi matahari dan beban serta mempertimbangkan masa pakai baterai dan kehandalan penyuplaian beban menjadi sangat penting.

Berbagai macam *topologi inverter* telah dikembangkan untuk menunjukkan control aliran daya yang efektif baik dalam operasi *grid connected* atau *stand alone*. Adapun solusi yang memungkinkan dalam frekuensi tinggi adalah dengan tidak menggunakan *transformator*, sedangkan untuk aplikasi daya rendah dan menengah dengan tidak menggunakan *galvanic isolation*, kondisi tersebut dapat dikatakan arsitektur “*transformeless*”. Selanjutnya terdapat solusi lain yaitu *multilevel inverter*, dimana output tegangan yang dihasilkan meningkat, output tegangan harmonisa menurun, dan filter output yang lebih murah. Inverter satu fasa lima tingkat *multistring* menjadi solusi baru-baru ini, karena memiliki karakteristik mengurangi kerugian saat *switch power* dan elektromagnetik interferensi (EMI). Topologi ini menawarkan beberapa keuntungan, seperti jumlah komponen yang lebih sedikit dan berkurangnya harmonisa. Namun, karena adanya kerugian *switching* daya pada alat bantu, sehingga menyebabkan efisiensi kecil dibandingkan dengan inverter tiga tingkat *multistring* yang konvensional, adapun inveter satu fasa dengan *generalized zero vectors* (GZV) skema modulasi, yang digunakan untuk menyederhanakan konfigurasi. Namun, GZV memiliki kekurangan yaitu konfigurasi ini masih beroperasi pada rentang tegangan yang terbatas serta mengalami penurunan efisiensi.

1.2 Tujuan

Pada tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut :

1. Mengetahui prinsip kerja *Multilevel Inveter Multistring*.
2. Mendesain dan mensimulasikan *multilevel inveter* dengan multi sumber DC.
3. Dapat mendesain *Multilevel Inverter* menggunakan 6 *Switch*
4. Dapat memperoleh hasil maksimal dari suatu *photovoltaic* (PV) dengan metode Maximum Power-Point Tracking Perturb and Observe.

1.3 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Sistem *photovoltaic* (PV) tidak selalu mengeluarkan daya yang maksimal
2. Aliran daya antara *photovoltaic* (PV) dan baterai memerlukan suatu control agar dapat maksimal.

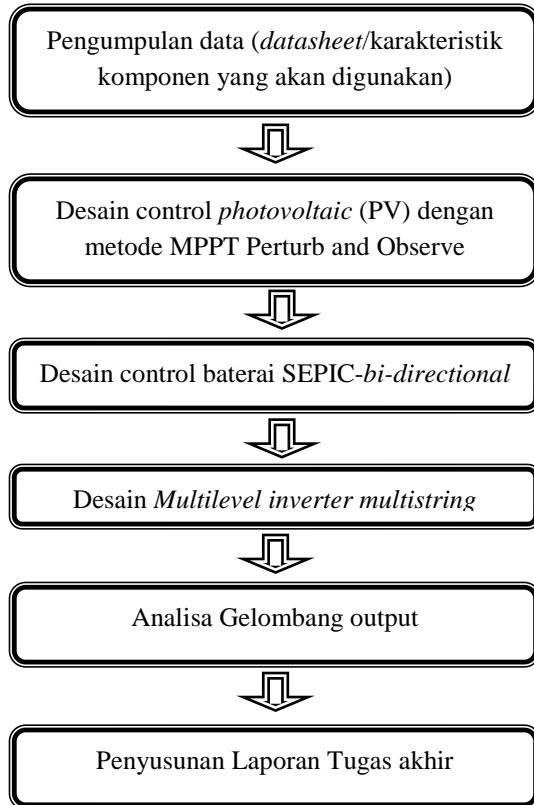
1.4 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini, diberi batasan masalah dan asumsi sebagai berikut :

1. Menggambar rangkaian *photovoltaic* (PV), Baterai *bidirectional*, dan *multilevel inverter* ke dalam software simulator.
2. Mengukur dan menganalisa tegangan output yang dihasilkan oleh *photovoltaic* (PV), Baterai *bidirectional* dengan asumsi komponen ideal.
3. Hasil yang akan dianalisis adalah saat sistem tersebut *steady state*.

1.5 Metodologi

Untuk mengerjakan Tugas Akhir diperlukan prosedur berupa langkah-langkah pengerjaan berdasarkan flowchart pada gambar 1.1.



Gambar 1.1 Metodologi Pengerjaan

1.5.1 Pengumpulan Data dan Studi Literatur

Sebelum mengerjakan Tugas Akhir ini, terlebih dahulu penulis melakukan pembelajaran tentang simulasi software yang digunakan dan pembelajaran dari literatur yang didapat.

Pengambilan dan pengumpulan data – data serta dasar teori yang digunakan sebagai acuan dalam penyelesaian Tugas Akhir. Dalam proses perancangan dan pengujian sistem, studi literatur digunakan untuk mendapatkan performa *photovoltaic* (PV), Baterai *bidirectional*, rangkaian *multilevel inverter*. Literatur didapatkan dari buku – buku, makalah-makalah, dan jurnal-jurnal di internet.

1.5.2 Mendesain rangkaian control *photovoltaic* (PV)

Setelah melakukan studi literatur, penulis mendesain rangkaian control *photovoltaic* (PV), dimana rangkaian tersebut dilengkapi Maximum Power-point Tracking (MPPT) dengan metode Perturb and observe. Rangkaian ini dibutuhkan, dengan harapan tegangan keluaran *photovoltaic* (PV) dapat maksimal, sesuai dengan datasheet. Kemudian tegangan output *photovoltaic* (PV) menjadi sumber *converter boost* agar tegangan sesuai dengan tegangan yang dibutuhkan *inverter*.

1.5.3 Menyusun Desain rangkaian control baterai SEPIC-*bidirectional*.

Konverter DC-DC memegang peranan penting dalam sistem PV *stand-alone*. Konverter yang dipilih harus dapat bekerja secara efektif sesuai kondisi sistem. Konverter yang digunakan adalah SEPIC – *bidirectional converter*. Konverter ini merupakan modifikasi dari jenis *SEPIC – Boost Converter* [2].

1.5.4 Menyusun desain rangkaian Multilevel inverter

Tegangan output dari baterai *bidirectional* dan *photovoltaic* (PV) merupakan sumber multistring rangkaian *Multilevel Inverter*. Rangkaian ini di lengkapi kontrol menggunakan switch gerbang logika. Tegangan output rangkaian ini juga dilengkapi filter LC agar hasil yang didapatkan lebih baik untuk beban.

1.5.5 Simulasi, Analisis dan Implementasi

Setelah menyusun rangkaian untuk penelitian ini, dibuat simulasi dengan software simulator dan dianalisa tegangan output pada

multilevel inverter secara software untuk mengetahui besar nilai daya.

1.5.6 Pembuatan Laporan Tugas Akhir

Pada tahap ini dilakukan pembuatan atau penulisan laporan Tugas Akhir. Pada laporan tersebut dijelaskan mengenai semua hal yang berkaitan tentang pengerjaan Tugas Akhir, seperti penjelasan tentang proses perencanaan sistem, sistem kerja *photovoltaic* (PV), Baterai *bidirectional*, *Multilevel Inverter*, data-data hasil simulasi, dan lain sebagainya. Diharapkan penulisan laporan tersebut dapat bermanfaat sebagai bahan acuan didalam penelitian serupa pada waktu yang akan datang.

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan penyusunan Tugas Akhir direncanakan sebagai berikut:

BAB I : Pendahuluan

Bab ini membahas pendahuluan yang terdiri dari latar belakang, tujuan, perumusan masalah, batasan masalah, metodologi, sistematika pembahasan dan tinjauan pustaka.

BAB II : Teori Penunjang

Bab ini membahas teori-teori yang menunjang dan berkaitan dengan penyelesaian Tugas Akhir, antara lain teori *photovoltaic* (PV), Baterai, konverter *SEPIC-bidirectional*, *Maximum Power-Point Tracking* (MPPT) *Perturb and Observe*, dan *Multilevel Inverter*.

BAB III : Perencanaan

Bab ini membahas tahap perencanaan dan pembuatan rangkaian pada Tugas Akhir ini.

BAB IV: Pengujian Sistem Dan Analisis

Bab ini membahas secara keseluruhan dari sistem dan dilakukan pengujian serta analisa pada setiap rangkaian yang disimulasikan kemudian berdasarkan data hasil pengujian dapat dilakukan analisa terhadap keseluruhan sistem.

BAB V : Kesimpulan Dan Saran

Bab ini membahas kesimpulan dari pembahasan, perencanaan, pengujian dan analisa berdasarkan data hasil pengujian sistem. Untuk meningkatkan hasil akhir yang lebih baik diberikan saran-saran terhadap hasil pembuatan Tugas Akhir.

1.7 Tinjauan Pustaka

Berdasarkan Tugas Akhir yang dikerjakan oleh saudara Yi-Hung Liao yaitu “*Newly-Constructed simplified Single-Phase Multistring Multilevel Inverter Topology for Distributed Energy Resources*”. Di bukunya berisi ulasan tentang Multilevel Inverter Satu fasa dengan sumber lebih dari satu.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II TEORI PENUNJANG

Pada Tugas Akhir ini terdapat beberapa teori penunjang yang akan mendukung penelitian yang akan dilaksanakan. Antara lain mengenai:

2.1 *Photovoltaic* (PV)

Photovoltaic (PV) adalah sumber energi terbarukan yang banyak digunakan orang untuk dijadikan sumber energi listrik. *Photovoltaic* (PV) memberikan banyak kemudahan yaitu mudah diimplementasikan dan cocok untuk digunakan di daerah tropis seperti Indonesia dengan intensitas panas matahari yang relatif lebih tinggi. *Photovoltaic* (PV) memiliki beberapa kelebihan yaitu, kemampuan beberapa *semiconductor* untuk mengkonversi radiasi elektromagnet secara langsung menjadi arus listrik. *Photovoltaic* (PV) terhubung beban akan menyebabkan mengalirnya arus.

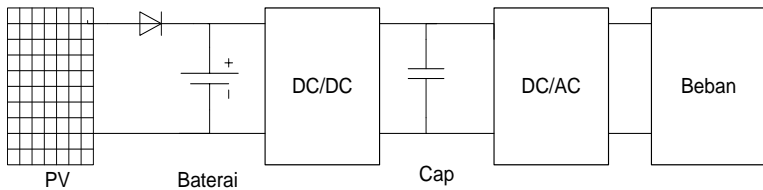
Sistem *photovoltaic* (PV) digunakan menjadi sistem *stand-alone* ketika saluran distribusi (power grid) tidak dapat dijangkau. Sistem *stand-alone* membutuhkan baterai sebagai tempat penyimpanan energi untuk menyuplai daya beban selama periode tanpa atau kekurangan *photovoltaic* (PV). Sistem pembangkit *photovoltaic* (PV) *stand-alone* merupakan sistem yang terdiri dari PV array, baterai, PV controller, dan inverter. Untuk beban – beban AC, inverter digunakan untuk mengubah daya DC dari baterai ke daya AC. Beberapa konfigurasi sistem *photovoltaic* (PV) *stand-alone* yang telah ada antara lain[3]:

- a) *Direct series* : seperti yang terlihat pada Gambar 2.1(a), hanya dioda yang digunakan untuk mengisolasi PV array dan baterai. Sistem ini paling cocok untuk sistem dengan daya rendah dan ekonomis. Pada sistem ini tidak perlu adanya manajemen tegangan dan arus ketika *charging* baterai dan pengaturan MPPT.
- b) *On-line series* : seperti yang terlihat pada Gambar 2.1(b), baterai secara langsung terkoneksi dengan DC bus. Sebuah konverter DC-DC mempunyai fungsi ganda yaitu sebagai kontrol MPPT dan charger baterai. Untuk beban – beban AC, konverter DC-DC yang lain dibutuhkan untuk meningkat tegangan baterai agar sesuai dengan tingkat tegangan DC bus yang dibutuhkan oleh inverter. Pada gambar tersebut terlihat bahwa baterai terlibat dalam konversi

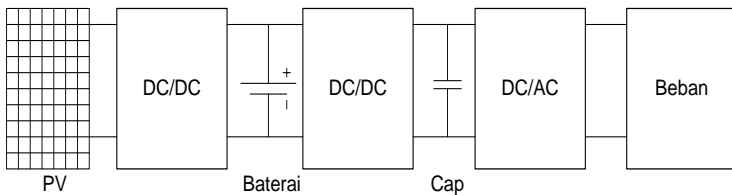
energi, dipengaruhi gangguan beban secara langsung, yang dapat mempengaruhi umur pakai dan pemanfaatan baterai.

- c) *Interactive series* : pada Gambar 2.1(c), terlihat bahwa ada dua konverter DC-DC dan satu inverter di dalam sistem. Dua konverter DC-DC ini merupakan *multistring converter* yang salah satu konverternya dimodifikasi agar dapat berfungsi dua arah untuk mengatur *charging* dan *discharging* baterai. Sedangkan konverter yang lain digunakan untuk mengatur daya output *photovoltaic* (PV)..

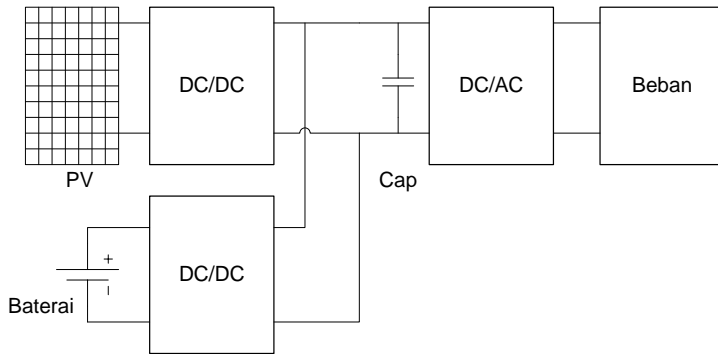
Jenis – jenis sistem *photovoltaic* (PV) di atas mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Pada penelitian ini, digunakan sistem jenis *interactive series*. Hal ini dikarenakan sistem ini mampu mengatur aliran daya antara *photovoltaic* (PV) , baterai, dan kondisi suhu dan intensitas cahaya matahari di sekitar sistem.



a. Direct Series



b. On-line Series

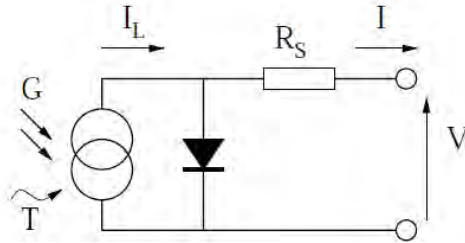


c. Interactive Series

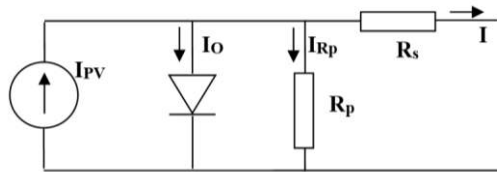
Gambar 2.1 Jenis – jenis sistem PV *stand-alone*

Photovoltaic (PV) mempunyai karakteristik tegangan (V) dan arus (I) yang nilainya berdasarkan iradiasi dan temperatur. Kurva I-V dapat menunjukkan titik daya maksimum. Kurva I-V didapatkan berdasarkan 2 kondisi yaitu *short circuit* dan *open-circuit*. Ketika kondisi *short circuit*, arus maksimum atau arus *short circuit* (I_{sc}) dihasilkan, sedangkan pada kondisi *open circuit* tidak ada arus yang dapat mengalir sehingga tegangannya maksimum, disebut tegangan *open-circuit* (V_{oc}). Titik pada kurva I-V yang menghasilkan arus dan tegangan maksimum disebut titik daya maksimum (MPP). Pemodelan rangkaian ekuivalen *photovoltaic* (PV) adalah sebuah sumber arus yang terpasang paralel dengan sebuah dioda. Besar arus output dari suatu *photovoltaic* (PV) berbanding lurus dengan besar iradiasi cahaya matahari yang diterima oleh *photovoltaic* (PV).

Sebuah *photovoltaic* (PV) dapat direpresentasikan oleh sebuah rangkaian ekuivalen seperti yang terlihat pada gambar 2.2 dan 2.3.



Gambar 2.2 Rangkaian ekivalen sederhana *photovoltaic* (PV)



Gambar 2.3 Rangkaian Ekivalen *photovoltaic* (PV)

Gambar 2.3 menunjukkan rangkaian ekivalen *photovoltaic* (PV) yang terdiri dari sebuah sumber arus, dioda D, tahanan seri R_s dan tahanan paralel R_p . Sumber arus paralel dengan dioda R_s dan tahanan paralel R_p , lalu seri dengan tahanan seri R_s .

Karakteristik *photovoltaic* (PV) bisa didapatkan menggunakan persamaan (1).

$$I = I_{PV} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V + IR_s}{N_s k T / q} \right)} - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right) \quad (2.1)$$

Keterangan:

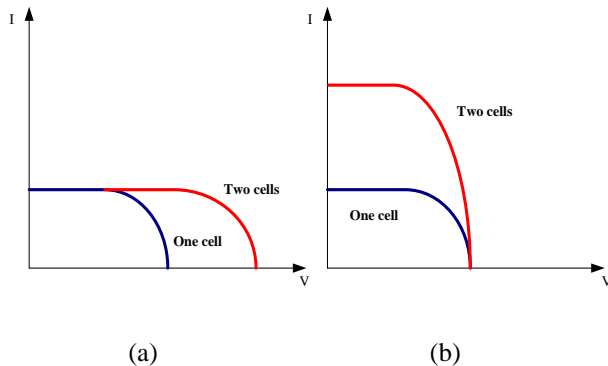
- I = arus keluaran *Photovoltaic* (A).
- I_{PV} = arus yang terbangkit pada *Photovoltaic* (A).
- I_0 = arus saturasi dioda.
- N_s = jumlah cell terhubung seri.
- k = konstanta Boltzman (j/K).

- T = Temperatur (K)
 q = muatan elektron = 1.6×10^{-19} (Coloumb).
 R_s = tahanan seri (Ohm).
 R_p = tahanan paralel (Ohm).
 V = tegangan keluaran *Photovoltaic* (V).

Karakteristik I-V *photovoltaic* (PV) diobservasi bahwa nilai R_s mendominasi tegangan operasi *photovoltaic* (PV) sedangkan nilai R_p mendominasi arus operasi *photovoltaic* (PV). Ketika nilai tahanan paralel (R_p) tinggi, maka arus yang melalui tahanan paralel (R_p) dapat diabaikan, hingga R_p Bernilai tak terbatas. Persamaan 1 tersebut dapat berubah menjadi :

$$I \approx n_p I_L - n_p I_0 \left(e^{\frac{q(V - I R_s)}{A k T n_s}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Dimana n_p dan n_s adalah jumlah *photovoltaic* (PV) yang disusun secara paralel dan seri. Karena dalam prakteknya untuk mendapatkan besar tegangan dan arus dengan nilai tertentu pada *photovoltaic* (PV), maka harus dilakukan pemasangan *photovoltaic* (PV) secara seri dan paralel. Gambar 2.4 adalah grafik arus dan tegangan (I-V) dari dua buah *photovoltaic* (PV) identik yang dihubungkan secara seri dan paralel :



Gambar 2.4 *Photovoltaic* (PV) dihubungkan seri (a) dan paralel (b)

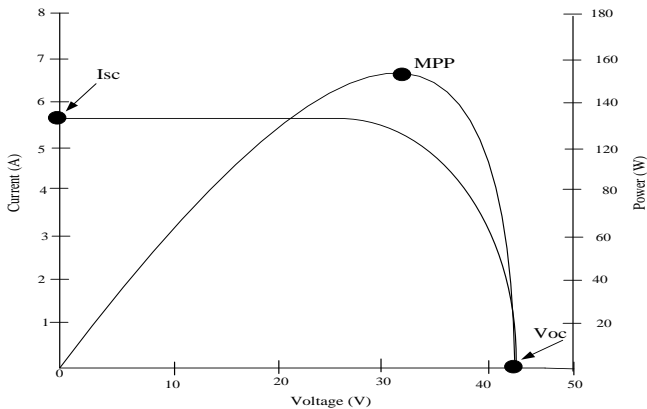
2.1.1 Karakteristik Arus-Tegangan *Photovoltaic* (PV)

Dua hal penting dari karakteristik arus-tegangan *Photovoltaic* (PV) yaitu tegangan rangkaian terbuka (V_{OC}) dan arus rangkaian tertutup (I_{SC}). Tegangan rangkaian terbuka dapat ditentukan melalui persamaan 2.3 saat arus keluaran sama dengan nol ($I=0$) dan tahanan seri diabaikan, Sehingga persamaan (2.1) menjadi seperti persamaan (2.3). Sementara arus rangkaian tertutup adalah arus saat $V=0$ dan nilainya mendekati dengan nilai arus masukan (I_L) seperti persamaan (2.4) [7].

$$V_{OC} \approx \frac{A \cdot k \cdot T}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.3)$$

$$I_{SC} \approx I_L \quad (2.4)$$

Maksimum daya dari *Photovoltaic* (PV) terjadi saat karakteristik arus-tegangan menghasilkan perkalian tegangan (V) dan arus (I) yang maksimum. Titik ini dikenal dengan *Maximum Power Point* (MPP) dan dapat dilihat pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Grafik V -Idan V - P pada *Photovoltaic* (PV) [4]

Keterangan :

I_{sc} = short-circuit current

V_{oc} = open-circuit voltage

MPP = maximum power point

2.1.2 Fill Factor (FF)

Dengan menggunakan arus dan tegangan saat *MPP* (I_{MPP} dan V_{MPP}), tegangan rangkaian terbuka (V_{OC}) dan arus rangkaian tertutup (I_{SC}), maka *fill factor* dapat ditentukan oleh persamaan (2.5):

$$FF = \frac{I_{MPP} \cdot V_{MPP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (2.5)$$

Fill Factor umumnya digunakan untuk mengetahui kualitas *photovoltaic* (PV) secara keseluruhan. Sebenarnya rasio persamaan (2.5) tidak dapat ditentukan, hal ini karena nilai $I_{MPP} \cdot V_{MPP}$ selalu di bawah dari nilai $I_{SC} \cdot V_{OC}$. Umumnya nilai untuk *FF* untuk *photovoltaic* (PV) komersial lebih dari 0.70 .

2.1.3 Efek Suhu dan Irradiant

Dua faktor penting yang mempengaruhi kinerja *Photovoltaic* (PV), yaitu *irradiant* dan suhu matahari. Keduanya sangat berpengaruh kuat terhadap perubahan karakteristik modul *Photovoltaic* (PV). Akibatnya titik maksimum daya bervariasi selama sehari dan itulah alasan mengapa titik maksimum daya harus ditentukan dan dipastikan agar daya yang dihasilkan modul *Photovoltaic* (PV) maksimal.

Iradiasi matahari berbanding lurus dengan arus yang dihasilkan *Photovoltaic* (PV) dan juga dipengaruhi oleh temperatur diberikan pada persamaan (2.6).

$$I_{pv} = [I_{pv,n} + K_I \Delta T] \frac{G}{G_n} \quad (2.6)$$

Keterangan:

I_{pv} = arus pada kondisi nominal (25^0C dan 1000 W/m^2)

ΔT = $T - T_n$

T = Temperatur aktual (K).

T_n = Temperatur nominal (K).

K_I = koefisien arus.

G = iradiasi aktual (W/m^2).

G_n = radiasi nominal (W/m^2).

Koefisien arus K_I dan tegangan K_V dimasukkan sebagaimana yang ditunjukkan dalam persamaan (2.7) untuk mendapatkan arus saturasi I_o yang dipengaruhi langsung oleh temperatur. [5]

$$I_o = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta T}{e^{\left(\frac{V_{oc,n} + K_V \Delta T}{a V_t} \right)} - 1} \quad (2.7)$$

Keterangan:

I_o = arus saturasi A

$I_{sc,n}$ = arus hubung singkat A

$V_{oc,n}$ = tegangan hubung terbuka V

K_I = koefisien arus.

K_V = koefisien tegangan.

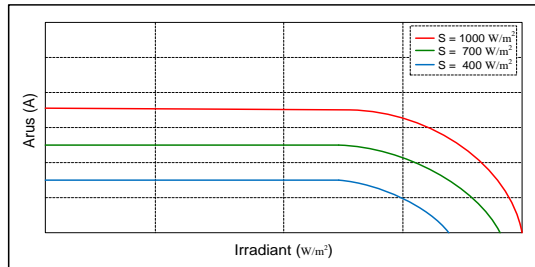
ΔT = $T - T_n$

T = Temperatur aktual (K).

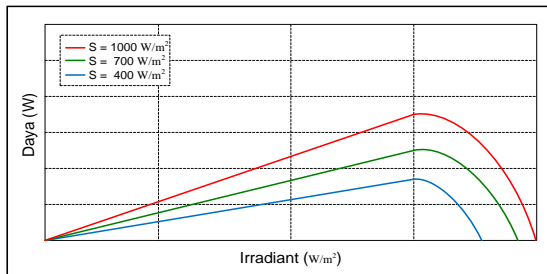
T_n = Temperatur nominal (K).

V_T = $N_s k T / q$

Gambar 2.6 merupakan kurva V-I dan Gambar 2.7 adalah kurva V-P, modul *Photovoltaic* (PV) pada suhu konstan 25°C dengan nilai *irradiant* bervariasi. Semakin tinggi nilai *irradiant* maka arus keluaran *Photovoltaic* (PV) semakin maksimal. Semakin tinggi nilai *irradiant* maka semakin besar pula daya keluaran *Photovoltaic* (PV).

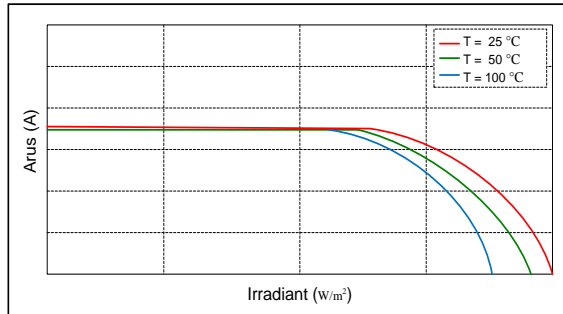


Gambar 2.6 Kurva *V-I Photovoltaic (PV)* dengan perubahan *irradiant*

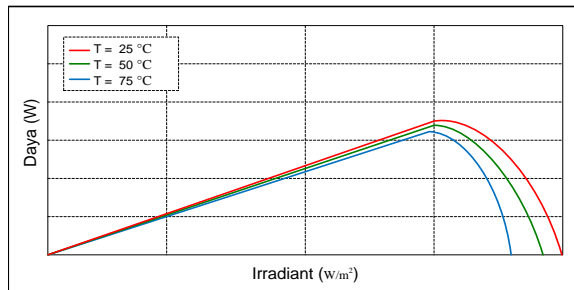


Gambar 2.7 Kurva *V-P Photovoltaic (PV)* dengan perubahan *irradiant*

Gambar 2.8 ialah kurva *V-I* dan Gambar 2.9 ialah kurva *V-P* modul *Photovoltaic (PV)* dengan *irradiant* konstan dengan suhu matahari yang bervariasi. Semakin tinggi nilai suhu matahari melebihi 25°C maka tegangan keluaran *Photovoltaic (PV)* justru semakin kecil. Kemudian semakin tinggi nilai suhu melebihi 25°C , maka daya keluaran *Photovoltaic (PV)* semakin kecil.



Gambar 2.8 Kurva V-I *Photovoltaic* (PV) dengan perubahan suhu matahari



Gambar 2.9 Kurva V-P *Photovoltaic* (PV) dengan perubahan suhu matahari

Apabila dalam sistem *Photovoltaic* (PV) tidak menggunakan daya maksimum maka akan timbul rugi-rugi daya yang besar. Maka dari itu kita harus mencari (*track*) titik daya maksimum modul *Photovoltaic* (PV) untuk menyakinkan bahwa daya yang dihasilkan selalu maksimum.

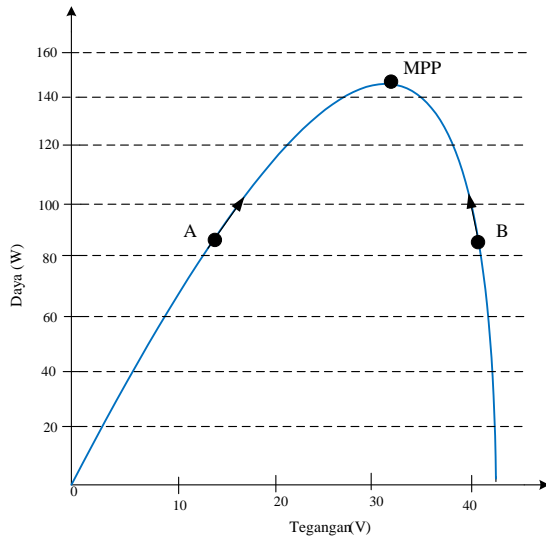
2.1.4 Maximum Power Point Tracking(MPPT) Metode Perturb and Observe (P&O)

MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) adalah teknik yang digunakan untuk menjaga sistem *photovoltaic* (PV) bekerja dalam *point* MPP (*maximum power point*). Pada Gambar 2.10 adalah grafik karakteristik dari panel surya. MPPT akan mempertahankan keluaran pada daya tertingginya, yaitu pada V_{MP} (*voltage maximum power*) dan I_{MP} (*current maximum power*). Untuk mempertahankan sistem dapat bekerja pada MPP, maka metode atau algoritma MPPT telah banyak dikembangkan yaitu :

- a) *Constant Voltage Methode*
- b) *Short Current Pulse Method*
- c) *Open Voltage Methode*
- d) *Perturb and Observe Methode*
- e) *Incremental Conductance Method*
- f) *Temperature Methode*

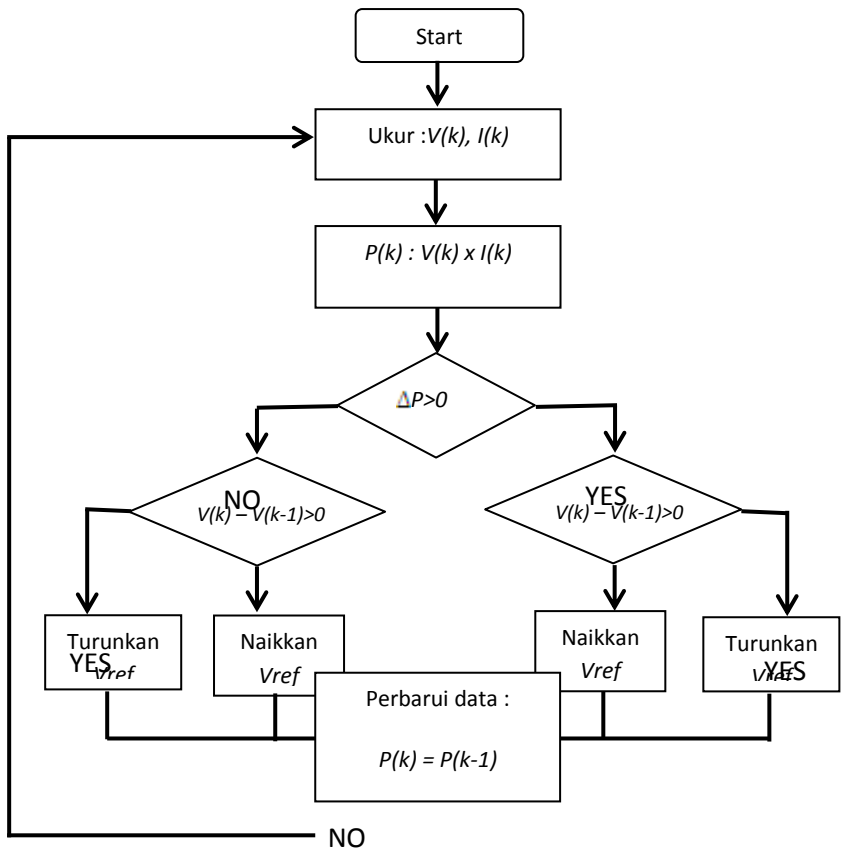
Perbedaan dari masing-masing metode misalnya peralatan sensor yang digunakan, kompleksitas algoritma, efektifitas metode, kecepatan menuju konvergensi, dan cara pelacakan (*tracking*) daerah daya maksimum modul *photovoltaic* (PV).

Dalam Tugas Akhir ini digunakan metode *Perturb and Observe* atau dikenal dengan metode "*hill climbing*".Metode *P&O* sangat terkenal dan biasa digunakan dalam kehidupan sehari-hari karena metode *P&O* memiliki tingkat efisiensi yang tinggi dan biaya yang dibutuhkan tidak terlalu mahal untuk implementasinya.Prinsip kerja metode *P&O* adalah menaikkan atau menurunkan (*perturbing*) teganganPV dengan kenaikan (*incremental*) yang kecil.



Gambar 2.10 Kurva titik kerja *photovoltaic* (PV) akibat perubahan beban.

Hal ini mengakibatkan terjadinya perubahan daya (ΔP) dan akan diperiksa (*observed*), jika ΔP bernilai positif maka akan titik daya akan berosilasi dan bergerak mendekati titik maksimum daya (*MPP*). Perubahan nilai tegangan operasi *PV* akibat *perturbingsikan* bergerak mengarah ke titik maksimum daya. Jika ΔP bernilai negatif, maka titik daya akan bergerak menjauh dari *MPP*. *Flowchart* algoritma *P&O* ditunjukkan pada Gambar 2.11 berikut :



Gambar 2.11 Flowchart dari algoritma *P&O*

2.2 Baterai

Baterai, adalah salah satu komponen utama dalam kendaraan listrik. *Accu* mampu mengubah tenaga kimia menjadi tenaga listrik. Dikenal dua jenis elemen yang merupakan sumber arus searah (DC) dari proses kimiawi, yaitu elemen primer dan elemen sekunder. Elemen primer terdiri dari elemen basah dan elemen kering. Reaksi kimia pada elemen primer yang menyebabkan elektron mengalir dari elektroda negatif (katoda) ke elektroda positif (anoda) tidak dapat dibalik arahnya. Maka jika muatannya habis, maka elemen primer tidak dapat dimuati kembali dan memerlukan penggantian bahan pereaksinya (elemen kering). Sehingga dilihat dari sisi ekonomis elemen primer dapat dikatakan cukup boros. Contoh elemen primer adalah batu baterai (*dry cells*).

Elemen sekunder dalam pemakaiannya harus diberi muatan terlebih dahulu sebelum digunakan, yaitu dengan cara mengalirkan arus listrik (secara umum dikenal dengan istilah 'disetrum'). Akan tetapi, tidak seperti elemen primer, elemen sekunder dapat dimuati kembali berulang kali. Elemen sekunder ini lebih dikenal dengan *accu*. Dalam sebuah *accu* berlangsung proses elektrokimia yang *reversible* (bolak-balik) dengan efisiensi yang tinggi. Yang dimaksud dengan proses elektrokimia *reversible* yaitu di dalam *accu* saat dipakai dan berlangsung proses pengubahan kimia menjadi tenaga listrik (*discharging*). Sedangkan saat diisi atau dimuati, terjadi proses tenaga listrik menjadi tenaga kimia (*charging*).

Pada *accu* yang digunakan untuk kendaraan listrik, arus yang terdapat di dalamnya dinamakan dengan kapasitas *accu* yang disebut Ampere-Hour/AH (Ampere-jam). Contohnya untuk *accu* dengan kapasitas arus 5 AH, maka *accu* tersebut dapat mencatu arus 5 Ampere selama 1 jam atau 1 Ampere selama 5 jam. Baterai dimodelkan menggunakan sebuah sumber tegangan terkontrol yang disusun seri dengan resistansi konstan, seperti pada Gambar 2.12. Model ini mengasumsikan karakteristik yang sama untuk siklus *charge* dan siklus *discharge*. Sumber tegangan terbuka dihitung dengan sebuah persamaan non – linier berdasarkan kondisi energi atau SOC (*State Of Charge*) dari pada baterai [4].

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - \int i_b dt} + A \cdot \exp \left(-B \int i_b dt \right) \quad (2.8)$$

dengan,

E adalah tegangan tanpa beban (V),

E_0 adalah tegangan konstan baterai (V),

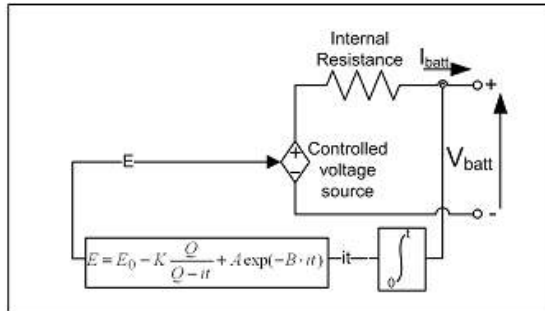
K adalah tegangan polarisasi (V),

Q adalah kapasitas baterai (Ah),

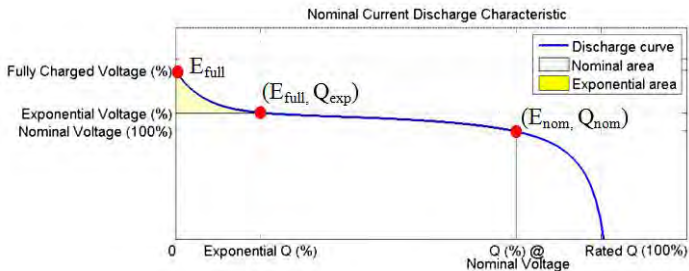
A adalah amplitudo daerah eksponensial (V), dan

B adalah konstanta waktu invers daerah eksponensial (Ah^{-1}).

Gambar 2.13 adalah karakteristik *discharging* dari baterai saat arus *discharging* dan seluruh parameter dapat dihitung dari tiga titik, yaitu tegangan *charging* (E_{full}), daerah eksponensial (E_{exp} , Q_{exp}), dan daerah nominal (E_{nom} , Q_{nom}).



Gambar 2.12. Pemodelan Rangkaian Baterai



Gambar 2.13. Kurva Karakteristik *Discharge* Baterai ($V - Q$)

$$\begin{aligned}
A &= E_{\text{full}} - E_{\text{exp}} \quad (2.9) \\
B &= \frac{3}{Q_{\text{exp}}} \quad (2.3) \\
K &= \left[E_{\text{full}} - E_{\text{nom}} + A \cdot \left(\exp(-BQ_{\text{nom}}) \right) - 1 \right] \frac{Q - Q_{\text{nom}}}{Q_{\text{nom}}} \quad (2.9)
\end{aligned}$$

Dimana :

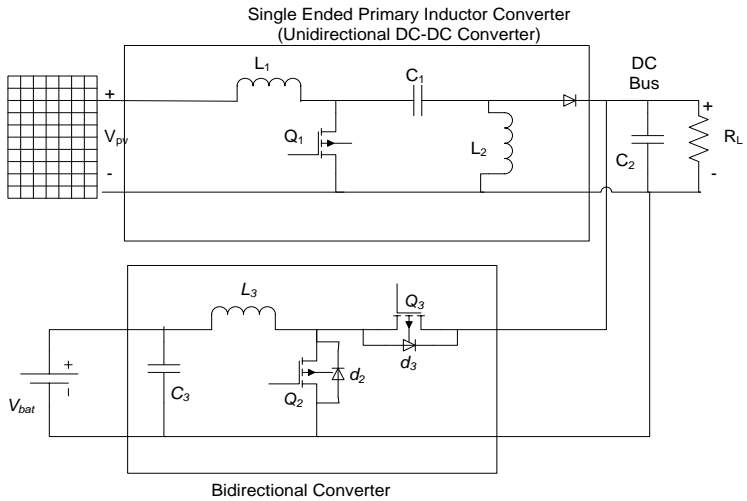
- E_{full} = tegangan baterai saat terisi penuh
- E_{exp} = tegangan baterai saat kondisi eksponensial
- E_{nom} = tegangan nominal baterai
- Q_{exp} = muatan baterai saat kondisi eksponensial
- Q_{nom} = muatan nominal baterai

2.3 SEPIC – Bidirectional Converter

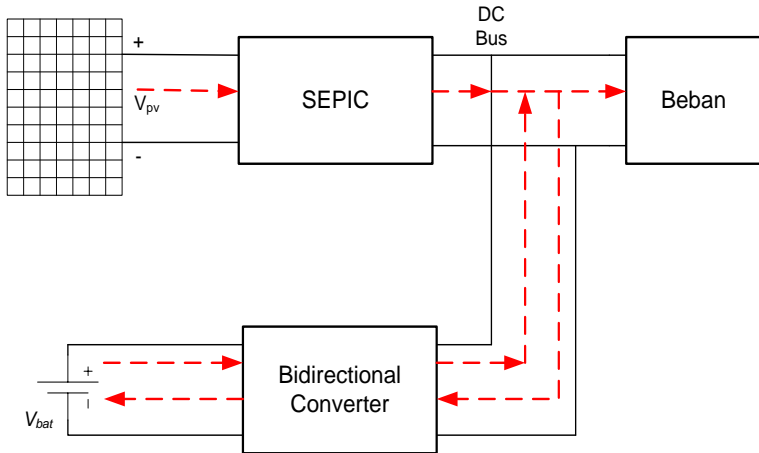
Konverter DC-DC memegang peranan penting dalam sistem PV *stand-alone*. Konverter yang dipilih harus dapat bekerja secara efektif sesuai kondisi sistem

Konverter yang digunakan adalah SEPIC – Bidirectional Converter. MIC ini merupakan modifikasi MIC jenis SEPIC – Boost Converter [6]. Modifikasi dilakukan dengan mengganti dioda pada Boost Converter. Dioda tersebut diganti oleh switch agar konverter dapat bekerja dalam dua arah. SEPIC digunakan untuk mengatur daya yang dikeluarkan oleh photovoltaic, sedangkan *bidirectional converter* digunakan untuk mengatur proses *charging* dan *discharging* pada baterai. Topologi ini ditunjukkan oleh Gambar 2.14.

Gambar 2.15 menunjukkan diagram aliran daya pada *multistring converter* ini. Aliran daya pada SEPIC merupakan satu arah dari *photovoltaic* (PV) menuju beban sedangkan pada *bidirectional converter* merupakan dua arah agar baterai dapat melakukan proses *charging* maupun *discharging*. Saat baterai berada dalam kondisi *charging*, *bidirectional converter* bekerja sebagai Buck, sedangkan dalam kondisi *discharging*, bekerja sebagai Boost.

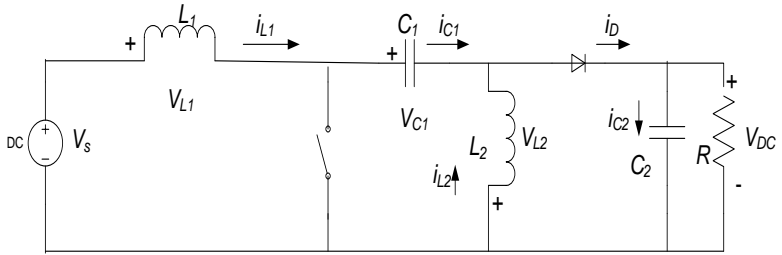


Gambar 2.14 Topologi Dual Inputs SEPIC – *bidirectional converter*

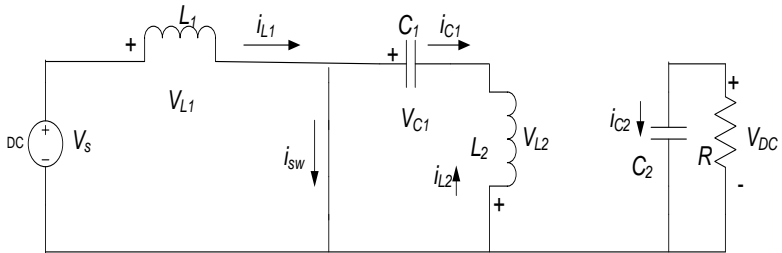


Gambar 2.15 Aliran daya pada Dual Inputs – Bidirectional Converter

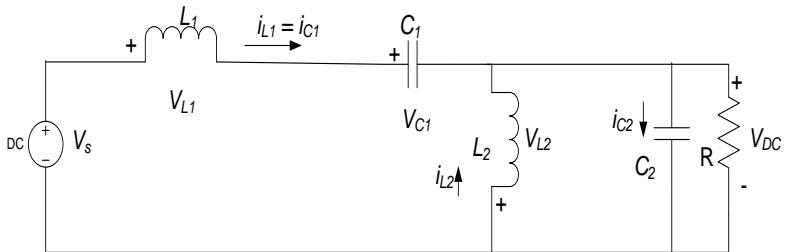
2.3.1 Single Ended Primary Inductor Converter (SEPIC)[6]



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.16 Rangkaian SEPIC

SEPIC merupakan konverter yang dapat menghasilkan tegangan output lebih besar ataupun lebih kecil dari tegangan input, seperti halnya

Buck-Boost *Converter* namun dengan polaritas tegangan output yang tidak terbalik. Bentuk rangkaian umum SEPIC terlihat pada Gambar 2.16(a). Untuk mendapatkan hubungan tegangan input dan output, digunakan beberapa asumsi awal yaitu :

- Nilai induktansi kedua induktor sangat besar dan arus yang melewatinya konstan.
- Nilai kapasitansi kedua kapasitor sangat besar dan tegangan pada kapasitor tersebut konstan.
- Rangkaian dioperasikan dalam kondisi *steady-state* (bentuk gelombang arus dan tegangan berulang).
- Untuk sebuah duty cycle D , switch tertutup untuk waktu DT dan terbuka untuk $(1-D)T$.
- Switch dan dioda ideal.

Hukum Kirchoff tegangan di sekitar jalur yang terdapat V_s , L_1 , C_1 , dan L_2 memberikan

$$-V_s + v_{L_1} + v_{C_1} - v_{L_2} = 0$$

Dengan menggunakan rata-rata dari tegangan – tegangan ini, maka

$$-V_s + 0 + V_{C_1} - 0 = 0$$

menunjukkan bahwa tegangan rata-rata pada kapasitor C_1 adalah

$$V_{C_1} = V_s \quad (2-10)$$

Ketika *switch* tertutup, dioda off, dan rangkaian terlihat seperti pada Gambar 2.16(b). Besar tegangan pada L_1 untuk interval DT adalah

$$V_{L_1} = V_s \quad (2-11)$$

Ketika switch terbuka, dioda on, dan rangkaian terlihat seperti pada Gambar 2.16(c). Hukum Kirchoff tegangan di jalur terluar rangkaian adalah

$$-V_s + v_{L_1} + v_{C_1} + V_{DC} = 0 \quad (2-12)$$

Dengan mengasumsikan tegangan pada C_1 tetap konstan pada nilari rata-rata V_s (persamaan 2.10), maka

$$-V_s + v_{L_1} + V_s + V_{DC} = 0 \quad (2-13)$$

atau
$$v_{L_1} = -V_{DC} \quad (2-14)$$

untuk interval $(1-D)T$. Saat tegangan rata-rata pada sebuah induktor adalah nol untuk operasi berulang, persamaan (2-11) dan (2-14) digabung untuk mendapatkan

$$\begin{aligned} (v_{L_1,sw_closed})(DT) + (v_{L_2,sw_open})(1-D)T &= 0 \\ V_s(DT) - V_{DC}(1-D)T &= 0 \end{aligned}$$

dengan D adalah *duty cycle* dari switch. Hasilnya adalah

$$V_{DC} = V_s \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (2-15)$$

yang dapat juga diekspresikan sebagai

$$D = \frac{V_{DC}}{V_{DC} + V_s} \quad (2-16)$$

Hasil ini hampir sama seperti pada persamaan konverter Buck-Boost dan Cuk, namun dengan suatu perbedaan yang penting bahwa tidak ada pembalikan polaritas antara tegangan input dan output. Kemampuan untuk mempunyai tegangan output yang lebih besar ataupun kecil dari tegangan input dengan tanpa adanya pembalikan polaritas membuat konverter ini cocok untuk banyak aplikasi, contohnya sistem *photovoltaic* (PV) yang mempunyai perbandingan tegangan input dan output yang kecil.

Dengan mengasumsikan tidak ada rugi-rugi pada konverter, daya yang tersuplai dari sumber adalah sama dengan daya yang diserap beban ($P_s = P_{DC}$). Daya yang tersuplai dari sumber DC adalah

$$P_s = V_s I_s = V_s I_{L_1}$$

Sedangkan daya output pada DC bus dapat diekspresikan sebagai

$$P_{DC} = V_{DC} I_{DC}$$

menghasilkan

$$V_s I_{L_1} = V_{DC} I_{DC}$$

Penyelesaian untuk arus rata-rata induktor, yang juga merupakan arus rata-rata sumber, maka

$$I_{L_1} = I_s = \frac{V_{DC} I_{DC}}{V_s} = \frac{V_{DC}^2}{V_s R} \quad (2-17)$$

Variasi di dalam i_{L1} ketika switch tertutup didapat dari

$$v_{L1} = V_s = L_1 \left(\frac{di_{L1}}{dt} \right) = L_1 \left(\frac{\Delta i_{L1}}{\Delta t} \right) = L_1 \left(\frac{\Delta i_{L1}}{DT} \right) \quad (2-18)$$

Sehingga, besarnya nilai induktor L_1 yang dipilih adalah

$$L_1 = \frac{V_s DT}{\Delta i_{L1}} = \frac{V_s D}{\Delta i_{L1} f} \quad (2-19)$$

dengan f adalah frekuensi switching yang dipakai.

Untuk L_2 , arus rata-rata ditentukan dari Hukum Kirchoff Arus pada titik dimana C_1 , L_2 , dan dioda terhubung.

$$i_{L2} = i_D - i_{C1}$$

Arus dioda adalah $i_D = i_{C2} + I_{DC}$ yang membuat

$$i_{L2} = i_{C2} + I_{DC} - i_{C1}$$

arus rata-rata pada setiap kapasitor adalah nol, sehingga arus rata-rata pada L_2 adalah

$$I_{L2} = I_{DC} \quad (2-20)$$

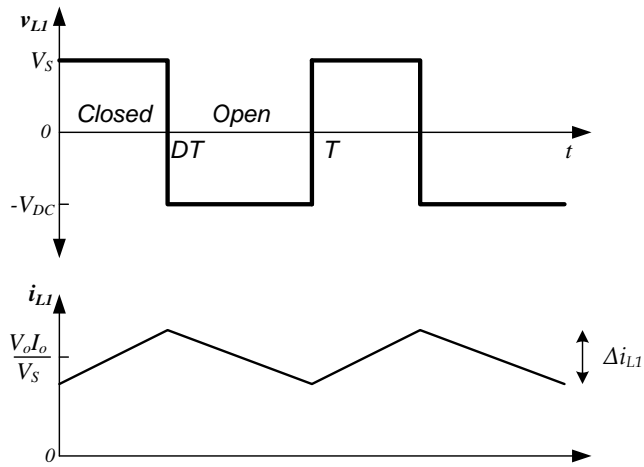
Variasi di dalam i_{L2} ditentukan dari rangkaian ketika switch tertutup. Dengan menggunakan Hukum Kirchoff Tegangan pada jalur switch yang tertutup, C_1 , dan L_2 dengan tegangan pada C_1 diasumsikan adalah V_s yang konstan, maka

$$v_{L2} = v_{C1} = V_s = L_2 \left(\frac{di_{L2}}{dt} \right) = L_2 \left(\frac{\Delta i_{L2}}{\Delta T} \right) = L_2 \left(\frac{\Delta i_{L2}}{DT} \right) \quad (2-15)$$

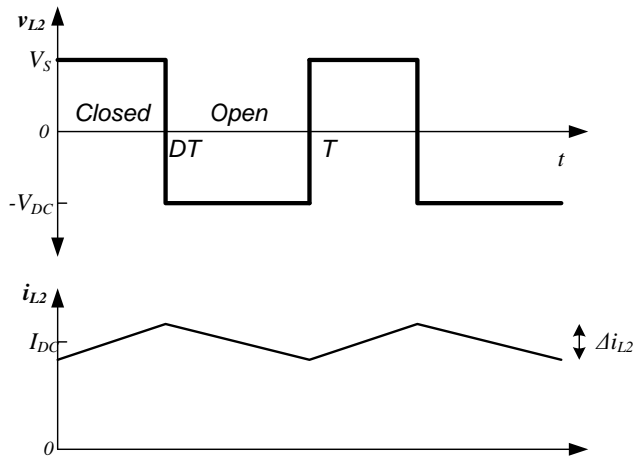
sehingga, besarnya nilai induktor L_2 yang digunakan adalah

$$L_2 = \frac{V_s DT}{\Delta i_{L2}} = \frac{V_s D}{\Delta i_{L2} f} \quad (2-21)$$

Bentuk tegangan dan arus induktor dalam satu periode switching ditunjukkan oleh Gambar 2.17.



(a) Tegangan dan arus induktor L_1



(b) Tegangan dan arus induktor L_2

Gambar 2.17 Bentuk tegangan dan arus induktor L_1 dan L_2

Hukum Kirchoff Tegangan diaplikasikan untuk menentukan nilai C_1 dan C_2 yang diperlukan. Pada Gambar 2.16(c), diasumsikan tidak ada tegangan pada kapasitor, maka tegangan pada switch ketika open adalah $V_s + V_{DC}$. Dari Gambar 2.17(b), tegangan reverse bias dioda ketika off juga $V_s + V_{DC}$. Bagian output terdiri dari dioda, C_2 , dan resistor beban yang sama seperti konverter Boost, sehingga tegangan ripple output adalah

$$\Delta V_{DC} = \Delta V_{C_2} = \frac{V_{DC} D}{RC_2 f} \quad (2-22)$$

Sehingga, nilai kapasitor C_2 yang diperlukan adalah

$$C_2 = \frac{D}{R(\Delta V_{DC} / V_{DC}) f} \quad (2-23)$$

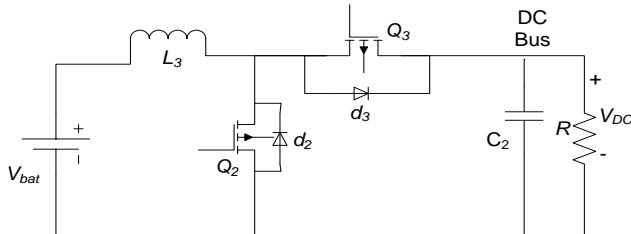
Variasi tegangan pada C_1 ditentukan dari rangkaian ketika switch tertutup (Gambar 2.16(b)). Arus kapasitor i_{C1} berlawanan dengan i_{L2} , yang sebelumnya telah ditentukan mempunyai nilai rata-rata dari I_{DC} . Dari definisi kapasitansi dan memikirkan besarnya muatan,

$$\Delta V_{C_1} = \frac{\Delta Q_{C_1}}{C} = \frac{I_{DC} \Delta t}{C} = \frac{I_{DC} DT}{C}$$

kemudian mengganti I_{DC} dengan V_{DC}/R , maka didapat besarnya C_1 yang diperlukan adalah

$$C_1 = \frac{D}{R(\Delta V_{C_1} / V_{DC}) f} \quad (2-24)$$

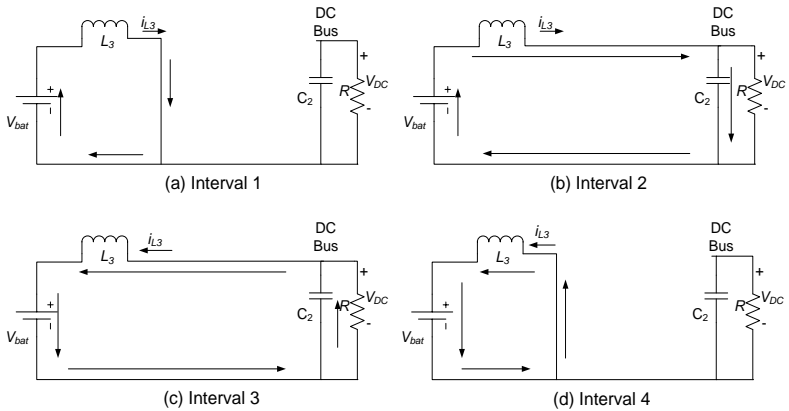
2.3.2 Bidirectional Converter



Gambar 2.18 Rangkaian *bidirectional converter*

Konverter ini merupakan modifikasi dari konverter Boost. Modifikasi dilakukan dengan menambah switch Q_3 pada dioda yang dipasang paralel dan begitu pula sebaliknya, pada switch Q_2 dipasang dioda yang diparalel. Hal ini diperlukan untuk membuat konverter dapat bekerja dalam dua arah, yaitu menjadi Boost saat baterai *discharging* dan Buck saat baterai *charging*. Gambar konverter ini terlihat pada Gambar 2.18.

Bidirectional Converter ini dioperasikan dalam *Continuous Conduction Mode* (CCM) untuk proses *charging* dan *discharging* baterai. Switch Q_2 dan Q_3 bekerja sedemikian rupa saat konverter beroperasi *steady-state* dengan 4 interval. Selain itu, perlu diketahui bahwa baterai berada pada tegangan rendah V_{bat} dan beban pada tegangan tinggi V_{DC} . Pengaturan gate dari switch Q_2 dan Q_3 ditunjukkan oleh Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Operasi Kerja Bidirectional Converter

Pada saat interval 1, switch Q_2 on dan switch Q_3 off dengan dioda d_3 dan d_2 bekerja *reverse biased* yang ditunjukkan Gambar 2.12(a). Selama interval ini, konverter bekerja dalam mode Boost dan induktor L_3 diisi dan arus yang melalui induktor L_3 meningkat. Besarnya *ripple* arus induktor L_3 selama interval ini adalah

$$V_{bat} = L_3 \frac{di_{L3}}{dt} = L_3 \frac{\Delta i_{L3}}{\Delta t} = L_3 \frac{\Delta i_{L3-Q2closed}}{D_2 T}$$

$$\Delta i_{L3-Q2closed} = \frac{V_{bat} D_2 T}{L} \quad (2-25)$$

Saat interval 2, ditunjukkan oleh Gambar 2.12(b), switch Q_2 dan Q_3 *off* dengan dioda d_2 *reverse biased* sedangkan dioda d_3 menjadi *forward biased*. Selama interval ini, konverter tetap bekerja pada mode Boost dan induktor L_3 beserta baterai menyalurkan arus ke beban. besarnya *ripple* arus induktor L_3 pada interval ini adalah

$$V_{bat} = L_3 \frac{di_{L3}}{dt} + V_{DC} = L_3 \frac{\Delta i_{L3}}{\Delta t} + V_{DC} = L_3 \frac{\Delta i_{L3-Q2open}}{(1-D)T} + V_{DC}$$

$$\Delta i_{L3-Q2open} = \frac{(V_{bat} - V_{DC})(1-D)T}{L_3} \quad (2-26)$$

Ketika keadaan *steady-state*, perubahan arus di induktor L_3 harus sama dengan nol. Dengan mengkombinasikan persamaan (2-25) dan (2-26), maka ditemukan hubungan tegangan baterai dan tegangan output saat interval 1 dan 2 adalah

$$V_{DC} = \frac{V_{bat}}{1-D_2} \quad (2-27)$$

dengan D_2 adalah duty cycle dari switch Q_2 .

Gambar 2.19(c) menunjukkan operasi kerja konverter saat interval 3. Pada interval ini, switch Q_3 on dan Q_2 off dengan dioda d_3 dan d_2 dalam kondisi *reverse biased*. Konverter bekerja dalam mode Buck, yaitu arus mengalir dari beban untuk mengisi induktor L_3 serta menuju baterai. Besarnya *ripple* arus induktor L_3 yang mengalir pada interval 3 adalah

$$V_{DC} = V_{bat} + L_3 \frac{di_{L3}}{dt} = V_{bat} + L_3 \frac{\Delta i_{L3-Q3closed}}{\Delta t} = V_{bat} + L_3 \frac{\Delta i_{L3-Q3closed}}{DT}$$

$$\Delta i_{L3-Q3closed} = \left(\frac{V_{DC} - V_{bat}}{L} \right) DT \quad (2-28)$$

Untuk interval 4 yang ditunjukkan oleh Gambar 2.19(d), switch Q_2 dan Q_3 off dengan dioda d_3 *reverse biased*, sedangkan dioda d_2 dalam kondisi *forward biased*. Pada interval ini, arus yang tersimpan pada induktor L_3 menyuplai baterai. Besarnya *ripple* arus induktor L_3 adalah

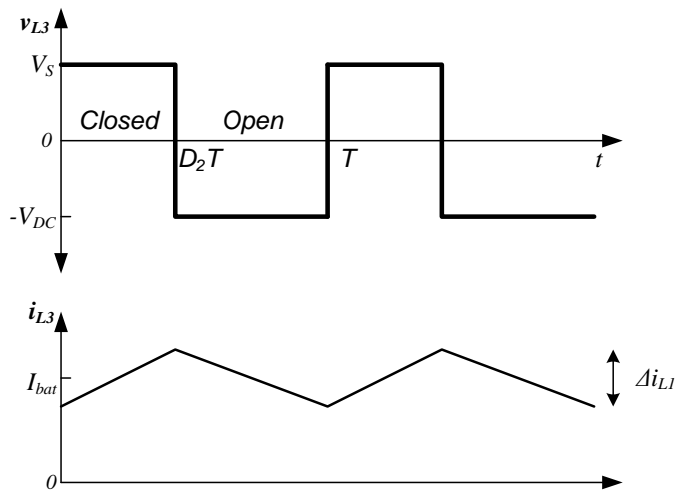
$$V_{bat} = -L_3 \frac{di_{L3}}{dt} = -L_3 \frac{\Delta i_{L3-open}}{\Delta t} = -L_3 \frac{\Delta i_{L3-open}}{(1-D)T}$$

$$\Delta i_{L3-open} = -\frac{V_{bat}}{L} (1-D)T \quad (2-29)$$

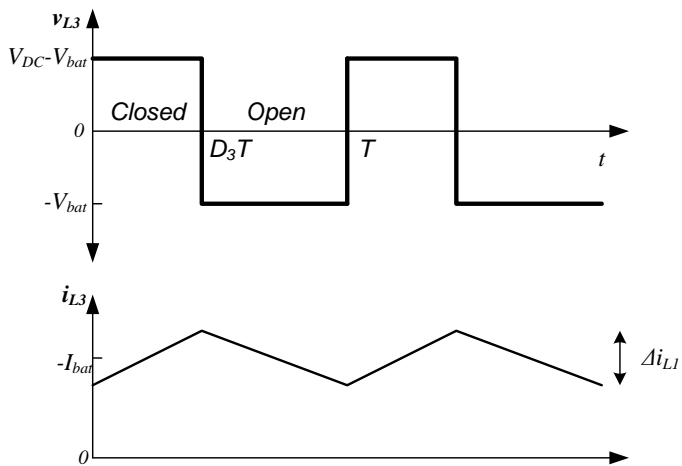
Saat kondisi *steady-state*, perubahan arus di induktor L_3 juga harus sama dengan nol. Dengan mengkombinasikan persamaan (2-28) dan (2-29), maka ditemukan hubungan tegangan baterai dan tegangan output saat interval 3 dan 4 adalah

$$V_{bat} = D_3 V_{DC} \quad (2-30)$$

dengan D_3 adalah duty cycle dari switch Q_3 . Bentuk tegangan dan arus induktor L_3 saat kondisi Boost dan Buck diperlihatkan pada Gambar 2.20.



(a) Tegangan dan arus induktor $L3$ saat kondisi boost



(b) Tegangan dan arus induktor $L3$ saat kondisi buck

Gambar 2.20 Bentuk tegangan dan arus induktor L_3

Pemilihan besarnya induktor L_3 yang digunakan dapat dicari menggunakan penjabaran persamaan (2-28) dan (2-30). Dikarenakan kondisi *steady-state*, maka

$$\Delta i_{L3_open} = \Delta i_{L3_closed} = \Delta i_{L3}$$

sehingga

$$L_3 = \left(\frac{V_{DC} - V_{bat}}{\Delta i_{L3}} \right) DT = \left(\frac{V_{DC} - V_{bat}}{\Delta i_{L3}} \right) \frac{V_{bat}}{V_{DC} f} \quad (2-31)$$

dengan f adalah frekuensi switching yang digunakan.

2.3.3 Mode Operasi Sistem

Mode kerja sistem PV *stand-alone* ini dirangkum dalam Tabel 2.1. Mode I merupakan kondisi dimana kebutuhan beban lebih besar dari daya maksimum yang dapat dibangkitkan oleh PV. SEPIC bekerja dengan kontrol MPPT untuk mengekstrak daya maksimum PV sedangkan kekurangannya akan disuplai oleh baterai sehingga Bidirectional Converter (BDC) bekerja dalam kontrol Boost.

Mode II merupakan kondisi dimana kebutuhan beban lebih kecil dari daya maksimum PV dan Baterai berada pada kondisi belum terisi penuh. SEPIC tetap bekerja dalam kondisi MPPT sedangkan kelebihan daya akan ditransfer menuju baterai dengan BDC dalam mode Buck.

Mode III hampir sama dengan mode II namun kondisi baterai telah terisi penuh. Hal ini mengakibatkan tidak boleh ada arus yang masuk ke baterai. SEPIC tidak lagi bekerja dalam kondisi MPPT, namun dalam kondisi Constant Current (CC). Hal ini ditujukan agar daya yang dikeluarkan oleh PV hanya sebatas kebutuhan beban. Bidirectional Converter bekerja sebagai Constant Voltage (CV) yaitu untuk menjaga tegangan DC bus agar tetap stabil sesuai referensi.

Tabel 2.1 Operasi *multistring input* SEPIC – *bidirectional converter*

	$P_{PV} < P_{load}$	$P_{PV} \geq P_{load}$
$V_{bat} < V_{bat_max}$	Mode I SEPIC : MPPT BDC : Boost	Mode II SEPIC : MPPT BDC : Buck
$V_{bat} \geq V_{bat_max}$		Mode III SEPIC : CC BDC : CV

2.4 Multilevel inverter

Inverter merupakan peralatan elektronik yang dapat mengubah listrik arus searah menjadi listrik arus bolak-balik [8]. Listrik arus bolak-balik yang dihasilkan dapat diatur tegangan maupun frekuensinya dengan menggunakan transformator, peralatan saklar dan rangkaian kontrol. Aplikasi *inverter* yang saat ini banyak digunakan antara lain untuk merubah tegangan dari sumber listrik arus searah seperti baterai atau sel surya agar menjadi tegangan listrik arus bolak-balik, kemudian tegangan tersebut disuntikkan ke sistem. Secara umum terdapat dua macam *inverter* berdasarkan sinyal keluaran yang dihasilkan, yaitu sinyal sinus modifikasi dan sinyal sinus murni.

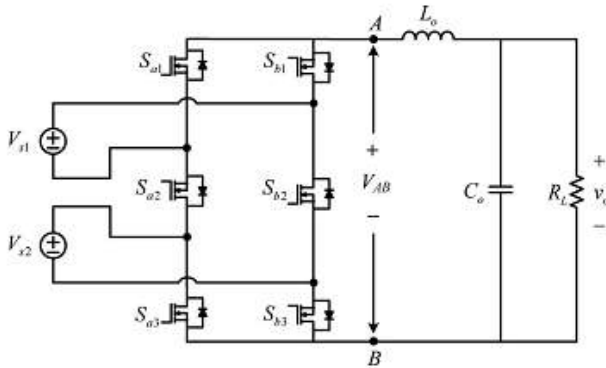
Berdasarkan referensi [10], besar tegangan output inverter dan harmonisa yang dihasilkan tergantung dari:

$$m_a = \frac{V_{kontrol}}{V_{tri}} \quad \text{dan} \quad m_f = \frac{f_{sw}}{f_{ref}}$$

sehingga
$$V_o = m_a \frac{V_{DC}}{\sqrt{2}} \quad (2-32)$$

dengan

$V_{kontrol}$	adalah amplitudo tegangan sinus referensi,
V_{tri}	adalah amplitudo tegangan segitiga,
f_{sw}	adalah frekuensi switching,
f_{ref}	adalah frekuensi pada sisi output inverter,
m_a	adalah indeks modulasi tegangan,
m_f	adalah indeks modulasi frekuensi.



Gambar 2.21 Rangkaian *Multilevel inverter*

Gambar diatas merupakan sebuah topologi *Multilevel Inverter Multitring* 1 fasa dengan dilengkapi 6 saklar yang dapat dikendalikan.

Tabel 2.2 Switching Multilevel Inverter

S_{a1}	S_{a2}	S_{a3}	S_{b1}	S_{b2}	S_{b3}	V_{AB}
0	1	0	1	0	1	$2 V_s$
0	1	1	1	0	0	V_s
1	1	0	0	0	1	V_s
1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0
1	0	0	0	1	1	$-V_s$
0	0	1	1	1	0	$-V_s$
1	0	1	0	1	0	$-2 V_s$

Dari tabel menunjukan bahwa saklar S_{a2} dan S_{b2} tidak boleh ditutup secara bersamaan karena akan membuat rangkaian menjadi terhubung singkat.

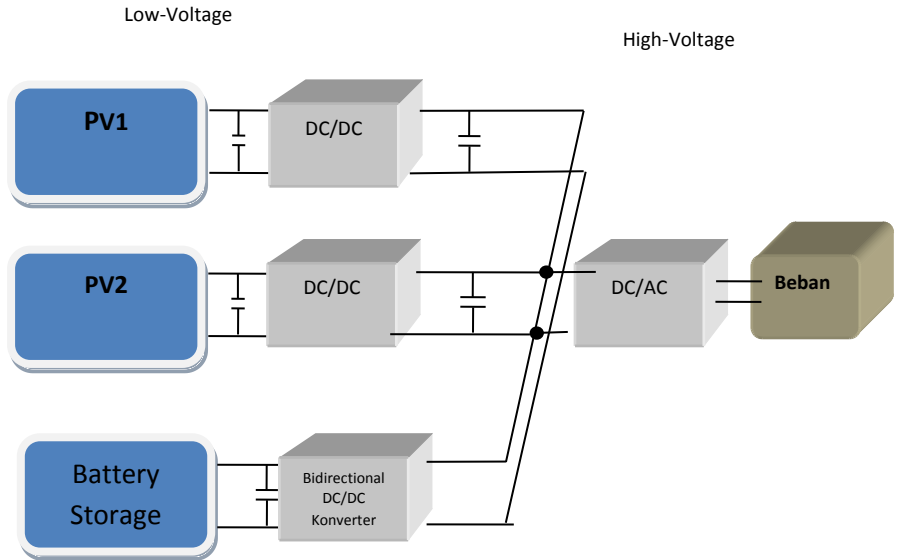
Di antara delapan kondisi pensaklaran pada table di atas, dua diantaranya (kondisi 4 dan 5) menghasilkan tegangan 0V sedangkan enam kondisi lainnya tidak. Tegangan keluaran yang mungkin

dihasilkan oleh *inverter* adalah $2V_s, 0, V_s, -V_s$ dan $-2V_s$. Untuk menghasilkan sinyal tegangan keluaran yang diinginkan, perlu dilakukan pemilihan kondisi yang dapat dicapai dengan teknik modulasi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3 PERENCANAAN

3.1 Pemodelan Sistem



Gambar 3.1 Konfigurasi Sistem Keseluruhan

Tabel 3.1 Spesifikasi tegangan pada sistem

Bagian	Nilai
Photovoltaic (PV)	PV1=150 V dan PV2=65 V
Baterai	240 V
DC Bus	400 V
Inverter Output	220 V _{rms}

Perancangan sistem secara umum dapat dilihat pada gambar 3.1. Pada sistem ini, komponen – komponen penyusunnya antara lain *photovoltaic* (PV), pemodelan baterai, *bidirectional DC – DC converter*, dan *Multilevel inverter single phase*.

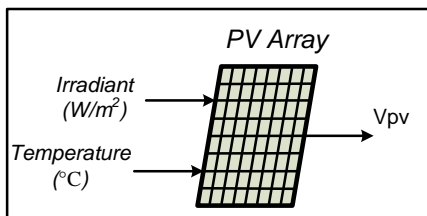
Sistem seperti ini dapat melakukan pengisian ataupun melepas energi yang ada pada baterai tergantung dari energi yang tersimpan dalam baterai atau SOC (*State Of Charge*). Jika nilai SOC kurang dari nilai yang ditentukan, maka sistem akan melakukan *charging* pada baterai dengan sumber yang berasal dari Photovoltaic (PV). Sedangkan jika nilai SOC melebihi nilai yang ditetapkan, maka baterai akan melakukan *discharging* energinya menuju beban.

3.2 Pemodelan Photovoltaic (PV)

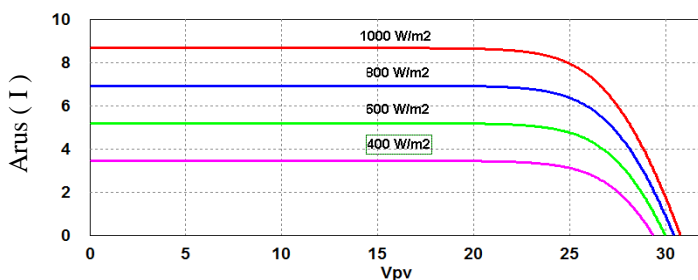
Pada penelitian ini menggunakan sumber daya listrik berupa Photovoltaic (PV). Photovoltaic (PV) yang digunakan adalah merk *Photovoltaic Module* PV-MLU250HC kapasitas 250 Watt. *Datasheet* Photovoltaic(PV) Mitsubishi PV-MLU250HC ditunjukkan pada Tabel 3.2. Blok diagram modul ini ditunjukkan pada Gambar 3.2

Tabel 3.2 Parameter *photovoltaic* (PV) Mitsubishi PV-MLU250HC

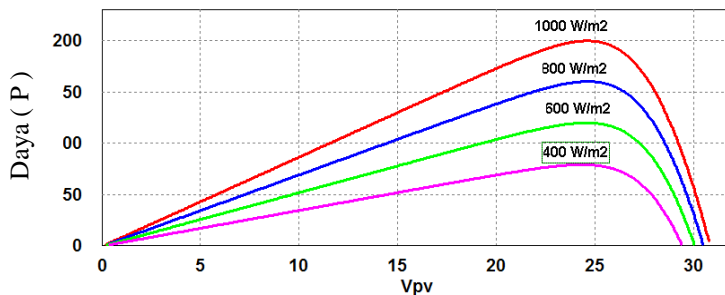
Parameter	Nilai
Jumlah sel surya	120
Daya maksimum	250 W
Tegangan daya maksimum	31,0 V
Arus daya maksimum	8,08 A
Tegangan rangkaian terbuka	30,76V
Batas arus hubung singkat	8,79 A
Koefisien suhu rangkaian terbuka	$-(111 \pm 10) \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$
Koefisien suhu rangkaian hubung singkat	$(0,065 \pm 0,015)\%/^{\circ}\text{C}$
Koefisien suhu daya	$47 \pm 2^{\circ}\text{C}$
Tes Uji Standar	
Intensitas cahaya	$1000\text{W}/\text{m}^2$
Suhu	25°C



Gambar 3.2Blok Diagram Photovoltaic (PV).



(a) Kurva I-V



(b) Kurva P-V

Gambar 3.3 Karakteristik kurva PV

Untuk mendapatkan besar daya yang diinginkan, maka diperlukan pemasangan hubungan seri-paralel. Hubungan seri akan meningkatkan

tegangan *photovoltaic* (PV) sedangkan hubungan paralel akan meningkatkan arus *photovoltaic* (PV), sehingga dengan hubungan seri-paralel akan meningkatkan daya. Dengan mengacu pada model *photovoltaic* (PV) Mitsubishi PV-MLU250HC, maka dirangkai secara seri untuk rangkaian PV1 sebanyak 2 buah dipasang secara seri dan PV2 sebanyak 4 buah dipasang secara seri. Sehingga diperoleh karakteristik *photovoltaic* (PV) sebagai berikut.

. **Tabel 3.3** Parameter *photovoltaic* (PV) dipasang secara seri

Parameter	Nilai	
	PV 1	PV 2
Jumlah sel surya	240	480
Daya maksimum	500 W	1000 W
Tegangan daya maksimum	62,0 V	148,0 V
Arus daya maksimum	8,08 A	8,08 A
Tegangan rangkaian terbuka	61,52V	123,04V
Batas arus hubung singkat	8,79 A	8,79 A
Koefisien suhu rangkaian terbuka	$-(111 \pm 10)$ mV/°C	$-(111 \pm 10)$ mV/°C
Koefisien suhu rangkaian hubung singkat	$(0,065 \pm 0,015)\%$ /°C	$(0,065 \pm 0,015)\%$ /°C
Koefisien suhu daya	$47 \pm 2^\circ\text{C}$	$47 \pm 2^\circ\text{C}$
Tes Uji Standar		
Intensitas cahaya	1000W/m ²	1000W/m ²
Suhu	25°C	25°C

3.2.1 Desain Kontrol MPPT

Pencarian titik daya maksimum atau MPPT dari PV adalah dengan menggunakan metode *P & O* (*Perturb and Observe*). Teknik *P&O* ini digunakan untuk mengatur *duty cycle boost converter* empat tingkat. *Flowchart* untuk MPPT ditunjukkan pada Gambar 2.11.

Desain MPPT yang digunakan memiliki input berupa tegangan dan arus PV yang digunakan untuk memperoleh daya PV (P_{pv}). Kemudian P_{pv} akan diturunkan melalui proses dP_{pv}/dV_{pv} . Apabila hasil yang diperoleh tidak nol, maka berarti daya yang dialirkan PV belum

maksimal. Hasil penurunan tersebut akan menaikkan atau menurunkan tegangan referensi PV yang selanjutnya diproses oleh sebuah rangkaian kontrol menghasilkan sinyal referensi V_{PVref} untuk mengatur *duty cycle*. Adapun konfigurasi kontrol *MPPT P&O* dapat dilihat pada Lampiran.

3.3 Desain SEPIC – Bidirectional Converter

Konverter DC-DC merupakan bagian penting dalam sistem *photovoltaic* (PV) *stand-alone*. Keefektifan sistem *photovoltaic* (PV) yang didesain dipengaruhi oleh desain konverter DC-DC. Pada subbab ini, dibahas perhitungan mengenai nilai – nilai komponen yang dipakai dalam sistem dengan memperhitungkan besarnya rating daya *photovoltaic* (PV), kapasitas baterai, dan kebutuhan beban. Selain itu, juga dibahas mengenai model kontrol yang digunakan.

3.3.1 Perhitungan Parameter SEPIC

Konverter SEPIC digunakan untuk mengatur daya yang dikeluarkan oleh PV array. Dari persamaan (2-16), besarnya *duty cycle* yang digunakan saat kondisi rating beban adalah

$$D1 = \frac{V_{DC}}{V_{DC} + V_{PV}} \qquad D = \frac{V_{DC}}{V_{DC} + V_{PV}}$$

$$D1 = \frac{400}{400 + 150} = 0,72 \qquad D = \frac{400}{400 + 62} = 0,86$$

Dengan *duty cycle* 0,72 dan 0,86 dan frekuensi switching ($f = 5000$ Hz), maka besarnya induktor yang dipilih adalah:

- Arus yang mengalir pada induktor L_1 :

$$i_{L_1} = \frac{P_{beban}}{V_{PV}} = \frac{1000}{150} = 6,67 \text{ A}$$

- Diasumsikan ripple induktor 10%, maka
 $\Delta i_{L_1} = 5\% \times i_{L_1} = 0,05 \times 6,67 = 0,33 \text{ A}$
- dengan persamaan (2-19), didapat

$$L_1 = \frac{V_s D}{\Delta i_{L_1} f}$$

$$L_1 = \frac{150 \times 0,72}{0,33 \times 10000} = 32,7 mH$$

- sedangkan nilai L_2 didapat menggunakan persamaan (2-19) dengan ripple 10%, maka

$$L_2 = \frac{V_s D}{\Delta i_{L_2} f}$$

$$L_1 = \frac{150 \times 0,72}{0,33 \times 10000} = 32,7 mH$$

Untuk nilai kapasitor yang diperlukan:

- diasumsikan ripple tegangan pada C_2 adalah 5%, maka
 $\Delta V_{C_2} = \Delta V_{DC} = 0,05 \times 400 = 20V$
- dengan persamaan (2-23), didapatkan

$$C_2 = \frac{D}{R(\Delta V_{DC} / V_{DC}) f}$$

$$C_2 = \frac{0,72}{160 \times (20 / 400) \times 10000} = 90 \mu F$$

- dan nilai C_1 adalah
 $\Delta V_{C_1} = \Delta V_{PV} = 0,05 \times 150 = 7,5V$

$$C_1 = \frac{D}{R(\Delta V_{C_1} / V_{DC}) f}$$

$$C_2 = \frac{0,72}{160 \times (7,5 / 150) \times 10000} = 90 \mu F$$

3.3.2 Perhitungan Parameter *Bidirectional Converter*

Pada perhitungan konverter ini, hanya diperlukan perhitungan besarnya induktor L_3 . Sebelumnya, perlu dihitung terlebih dahulu nilai *duty cycle* dengan menggunakan persamaan (2-30).

$$V_{bat} = DV_{DC}$$

$$D = \frac{V_{bat}}{V_{DC}} = \frac{240}{400} = 0,6$$

Arus baterai yang mengalir melewati induktor adalah

$$i_{L_3} = i_{Bat} = \frac{1000}{240} = 4,17 A$$

Dengan mengasumsikan ripple arus induktor L_3 sebesar 5%, maka

$$\Delta i_{L_3} = 0,05 \times 4,17 = 0,2 A$$

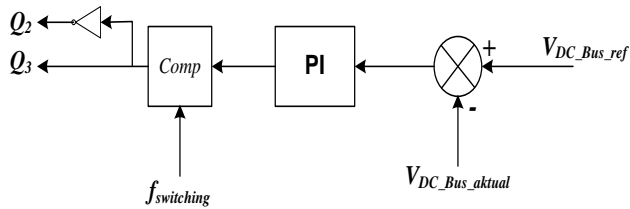
Lalu, dengan persamaan (2-31) didapatkan nilai induktor L_3 yaitu

$$L_3 = \left(\frac{V_{DC} - V_{bat}}{\Delta i_{L_3}} \right) \frac{V_{bat}}{V_{DC} f}$$

$$L_3 = \left(\frac{400 - 240}{0,2} \right) \frac{240}{400 \times 10000} = 48 mH$$

3.3.3 Desain Kontrol *Bidirectional*

Sistem kontrol ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu kontrol SEPIC dan kontrol Bidirectional. Kontrol SEPIC bekerja untuk mengatur switch Q_1 agar SEPIC dapat menyalurkan daya *photovoltaic* (PV) sesuai permintaan, yaitu sebagai MPPT ataupun Constant Voltage. Sedangkan kontrol Bidirectional Converter bertugas untuk mengatur switch Q_2 dan Q_3 agar Bidirectional Converter mengalirkan daya dari atau menuju baterai. Bentuk kontrol dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Sistem Kontrol Dual Inputs Bidirectional Converter

Dari Gambar 3.4, terlihat bahwa kontrol *bidirectional converter* merupakan closed loop dengan jenis kontrol tegangan DC bus. Tujuannya adalah menjaga tegangan DC bus pada kisaran 400 V dengan mengatur penyalan switch Q_2 dan Q_3 . Selain itu, kontrol ini secara otomatis juga dapat mengatur fungsi kerja Bidirectional Converter (mode Boost atau Buck). Ketika *photovoltaic* (PV) kelebihan daya, kontrol ini bekerja dalam mode Buck sebagai kontrol tegangan input (tegangan DC bus). Saat *photovoltaic* (PV) kekurangan daya, kontrol ini berganti untuk bekerja dalam mode Boost sebagai kontrol tegangan output (tegangan DC bus).

3.3.4 Desain Kontrol Duty Cycle

Konsep kerja dari kontroler ini adalah membandingkan tegangan referensi yang dihasilkan oleh kontrol *MPPT* dengan tegangan *PV* yang terukur. Desain kontroler *duty cycle* yang digunakan adalah seperti pada Gambar 3.5. Perbandingan ini akan menghasilkan sinyal error dengan rumusan sebagai berikut :

$$V_{PV\text{error}}(t) = V_{PV\text{ref}} - V_{PV}(t) \quad (3.1)$$

Sinyal error lalu diolah oleh kontroler PI menghasilkan sinyal referensi dengan rumusan:

$$V_{Dref}(t) = K_{pdc} \times V_{PV\text{err}}(t) + K_{idc} \int_0^t V_{PV\text{err}}(t) dt \quad (3.2)$$

Dimana,

$V_{PV\text{err}}$ = Sinyal tegangan *error* PV (volt)

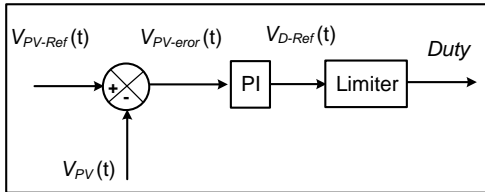
$V_{PV\text{ref}}$ = Tegangan referensi PV (volt)

V_{PV} = Tegangan PV terukur. (volt)

V_{Dref} = Sinyal output PI yang akan dimodulasi (volt)

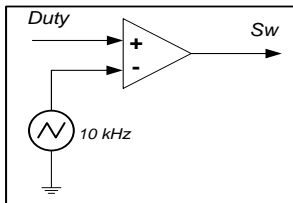
K_{pdc} = Konstanta proportional PI V_{dc} .

K_{idc} = Konstanta integral PI V_{dc} .



Gambar 3.5 Kontrol *Duty Cycle*.

Sinyal keluaran dari limiter (*duty cycle*) akan dikomparasikan dengan sinyal gergaji melalui komparator dan menghasilkan sinyal PWM yang digunakan untuk pensaklaran *SEPIC converter* seperti pada Gambar 3.6.



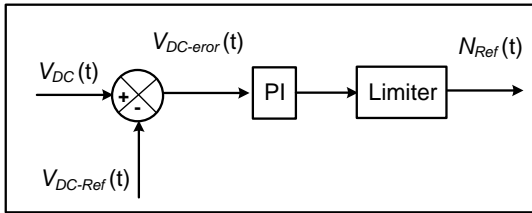
Gambar 3.6 Pensaklaran *SEPIC converter*

3.3.5 Desain Kontrol *DC-Link*

Berdasarkan perubahan intensitas cahaya matahari yang diterima *PV* mengakibatkan perubahan tegangan dan daya keluaran *PV*. Apabila terjadi perubahan pada daya keluaran *PV* maka kecepatan motor induksi sebagai beban sistem juga berubah menyesuaikan daya keluaran *PV*. Kontrol *DC-link* hal ini bertujuan untuk menjaga agar tegangan keluaran *boost converter* tetap konstan. Jika tegangan masukan *inverter* dapat dijaga konstan maka tegangan keluaran *inverter* juga dijamin akan stabil. Desain kontrol *DC-Link* ditunjukkan pada Gambar 3.7.

Konsep kerja dari controller ini adalah membandingkan tegangan referensi yang diinginkan dengan tegangan *DC-link* yang terukur. Perbandingan ini akan menghasilkan sinyal *error* sesuai persamaan 3.3

$$V_{DC-err}(t) = V_{DC-ref} - V_{DC} \quad (3.3)$$



Gambar 3.7Rangkaian kontrol *DC-Link*

Sinyal *error* lalu diolah oleh controller PI menghasilkan sinyal referensi dengan rumusan:

$$N_{ref}(t) = K_{pdc}(t) + K_{idc} \int_0^t V_{DC-err}(t) dt$$

3.4 Desain Pemodelan Baterai

Baterai pada simulasi mengambil parameter – parameter berdasarkan baterai riil. Jenis baterai yang digunakan sebagai acuan adalah baterai VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*) dengan spesifikasi masing – masing sel ditunjukkan pada Tabel 3.4. Baterai per sel ini kemudian di seri sebanyak 12 buah baterai untuk menghasilkan tegangan sebesar 24 Volt.

Tabel 3.4 Spesifikasi Parameter Baterai yang Digunakan

Parameter	Nilai
<i>Rated Voltage</i>	12 V
<i>Rated Capacity</i>	5 Ah
<i>Internal Resistance</i>	0,06 mΩ

didapatkan perhitungan sebagai berikut:

- Nominal Voltage* (E_{nom}) = 20 x 12 = 240 V
- Full Charge Voltage* (E_{full}) = 108 % x E_{nom} = 1,08 x 240 = 259,2 V

- c. *Exponential Voltage* (E_{exp}) = 102,5 % x E_{nom} = 1,025 x 240 = 246 V
d. *Rated Capacity* (Q_{nom}) = 50 % x Q_{rated} = 0,5 x 5 = 2,5 Ah
e. *Exponential Capacity* (Q_{exp}) = 0,08% x Q_{rated} = 0,0008 x 5 = 4 mAh
f. *Internal Resistance* (R_i) = 0,06 m Ω x 20 = 1,2 Ω

Menentukan konstanta A, B, dan K :

$$A = E_{\text{full}} - E_{\text{exp}} = 259,2 - 246 = 13,2$$

$$B = \frac{3}{Q_{\text{exp}}} = \frac{3}{0,004} = 750$$

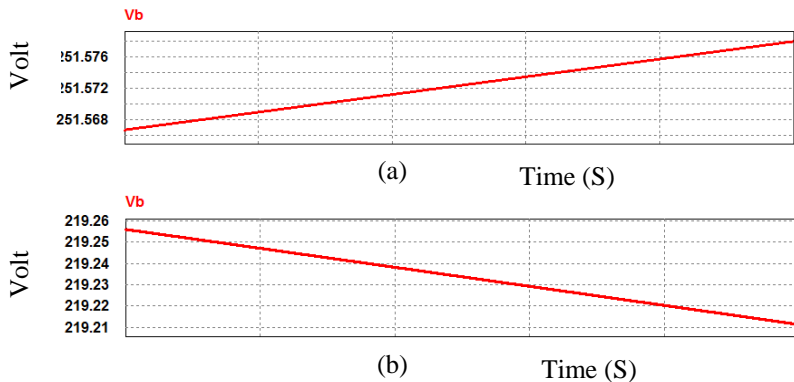
$$K = [E_{\text{full}} - E_{\text{nom}} + A \cdot (\exp(-BQ_{\text{nom}}) - 1)] \frac{Q - Q_{\text{nom}}}{Q_{\text{nom}}}$$

$$K = [E_{\text{full}} - E_{\text{nom}} + A(\exp(-BQ_{\text{nom}}) - 1)] \frac{Q - Q_{\text{nom}}}{Q_{\text{nom}}}$$

$$K = [259,2 - 240 + 13,2 \times (\exp(-750 \times 2,5) - 1)] \frac{5 - 2,5}{2,5}$$

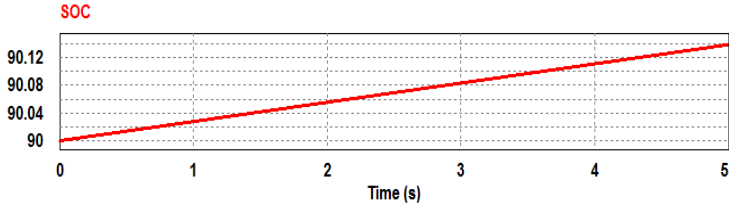
$$K = 6,6$$

Berdasarkan perhitungan diatas, maka didapatkan kurva karakteristik model baterai pada saat *charge* dan *discharge* yang dilihat berdasarkan tegangan terminal baterai sebagai berikut.

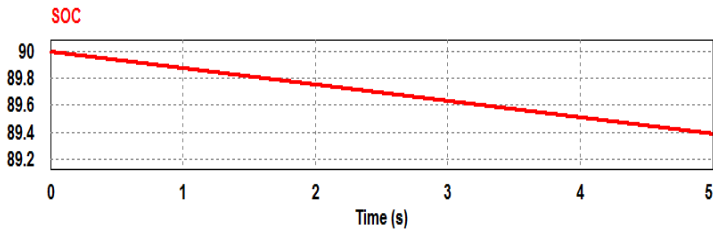


Gambar 3.8 Kurva Karakteristik Baterai Saat:(a) *Charging*,
(b) *Discharging*

Serta didapat perubahan nilai SOC baterai pada saat *charge* maupun *discharge*.



(a)



(b)

Gambar 3.9 SOC Baterai Saat :(a) *Charging*, (b) *Discharging*

3.5 Desain Multilevel Inverter

Multilevel Inverter satu fasa dengan jenis unipolar SPWM digunakan untuk mengubah tegangan DC 400 V menjadi tegangan AC 220 V_{rms} 50 Hz. Frekuensi *switching* yang dipakai adalah 10000 Hz. Dengan informasi tersebut, besarnya indeks modulasi inverter m_a dapat diketahui menggunakan persamaan (2-32).

$$V_o = m_a \frac{V_{DC}}{\sqrt{2}}$$

$$220 = m_a \frac{400}{\sqrt{2}}$$

$$m_a = \frac{311}{400} = 0,77$$

3.5.1 Desain Filter Pasif LC

Dalam penelitian ini, jenis filter yang dipakai adalah filter pasif LC. Nilai L dan C yang diperlukan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan – persamaan pada [13]. Persamaan umum untuk tegangan harmonisa ke- h adalah

$$|V_h| = h \times X_L \times I_h$$

dimana I_h dan X_L merupakan arus harmonis ke- h dan impedansi dari L yang dipilih. Untuk harmonisa ke-3,

$$\frac{|V_h|}{V_1} = \frac{3X_L I_3}{V_1}, \text{ dimana THD adalah } \frac{|V_h|}{V_1} = 3\% = 0,03 \text{ dan arus}$$

harmonisa ke-3 yang diketahui adalah 0.15 A, maka nilai impedansi induktor X_L

$$X_L = \frac{0.03V_1}{3I_3} = \frac{0,03 \times 220}{3 \times 0,15} = 14,66\Omega$$

Untuk mengetahui frekuensi resonansi, dapat dihitung menggunakan persamaan

$$\frac{f_{res}}{f_1} = \sqrt{\frac{m_f^2}{34,2}}$$

dengan m_f merupakan indeks modulasi frekuensi. Nilai m_f pada inverter ini adalah

$$m_f = \frac{f_{sw}}{f_1} = \frac{10000}{50} = 200$$

Maka besarnya frekuensi resonansi,

$$\frac{f_{res}}{f_1} = \sqrt{\frac{m_f^2}{34,2}} = \sqrt{\frac{200^2}{34,2}} = 34.2$$

$$f_{res} = 50 \times 34,2 = 1710Hz$$

Untuk frekuensi resonansi, impedansi X_L dan X_C adalah sama. Akhirnya, nilai L dan C yang ditemukan adalah

$$L = \frac{X_L}{2\pi f_{res}} = \frac{14,66}{2\pi \times 1710} = 1,36mH$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_{res} X_C} = \frac{1}{2\pi \times 1710 \times 14,66} = 6,37\mu F$$

BAB 4

SIMULASI SISTEM DAN ANALISIS DATA

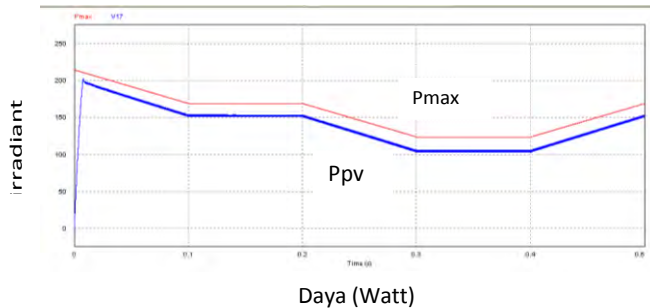
Pada bab ini keefektifan kinerja sistem dibahas melalui simulasi dan melakukan analisis terhadap data-data yang didapatkan dari hasil simulasi. Simulasi yang dilakukan antara lain adalah simulasi kinerja kontrol MPPT, simulasi sistem saat kondisi statis, dan simulasi kinerja sistem saat kondisi transien.

4.1 Simulasi Kinerja MPPT

Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana kinerja MPPT pada sistem. Seberapa besar daya yang dapat dikeluarkan oleh PV dengan bantuan kontrol MPPT pada konverter SEPIC. Rangkaian yang digunakan terdiri dari *photovoltaic* (PV), konverter SEPIC, kontrol MPPT, dan beban. Simulasi dilakukan dalam dua kondisi, yaitu variasi intensitas cahaya dan variasi beban. Analisis hasil simulasi adalah membandingkan efisiensi daya output PV saat dan tanpa menggunakan MPPT. Selain itu, juga dianalisis keakurasian MPPT dengan membandingkan daya *photovoltaic* (PV) saat berada dalam kondisi maksimum.

4.1.1 Kinerja MPPT dengan Variasi Intensitas Cahaya Matahari

Intensitas cahaya matahari divariasikan saat 1000 W/m^2 , 800 W/m^2 dan 600 W/m^2 sedangkan suhu dijaga konstan sebesar 25°C untuk semua kondisi. Beban merupakan komponen resistif murni dengan nilai 200 Ohm . Simulasi dilakukan dengan secara langsung memvariasikan intensitas cahaya dalam satu waktu. Gambar 4.1(a) menunjukkan kondisi cahaya matahari yang berubah pada setiap waktu, dimana kurva tersebut juga membandingkan daya *output photovoltaic* (PV) dengan Daya maksimal (P_{max}). Terlihat bahwa walaupun intensitas matahari bervariasi, maka daya *output* juga mengikuti dikarenakan adanya MPPT.



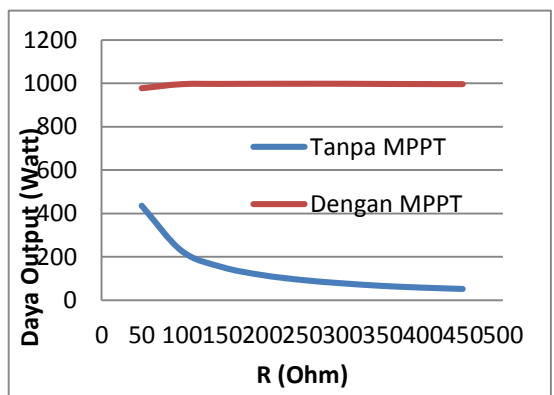
Gambar 4.1 Kurva Pmax dengan Ppv dengan variasi Irradiant

4.1.2 Kinerja MPPT dengan Variasi beban

Beban yang digunakan merupakan resistor murni yang divariasikan dari 50 Ohm sampai 450 Ohm. Sedangkan intensitas cahaya matahari yang digunakan adalah 1000 W/m^2 dengan suhu konstan 25°C . Hasil pengukuran daya output PV ditunjukkan oleh Gambar 4.2.

Tabel 4.1 Data variabel beban

Beban (Ohm)	tanpa MPPT (Watt)	dengan MPPT (Watt)
50	436	978
100	227	996
150	153	997
200	116	997.6
250	93.2	997.7
300	77.9	997.7
350	66	996.9
400	58	996.3
450	52	996



Gambar 4.2 perbandingan tanpa MPPT dan menggunakan MPPT

Pada Gambar 4.2, terlihat bahwa daya output yang dikeluarkan *photovoltaic* (PV) semakin menurun dengan kenaikan nilai resistor bila tanpa menggunakan MPPT. Nilai daya tertinggi yaitu 436 W didapatkan saat PV dibebani 50 Ohm dan daya terendah yaitu 52 W saat PV dibebani 450 Ohm. Sedangkan kontrol MPPT dapat menjaga daya output PV tetap di kisaran daya maksimumnya dengan daya output rata-rata 995 Watt.

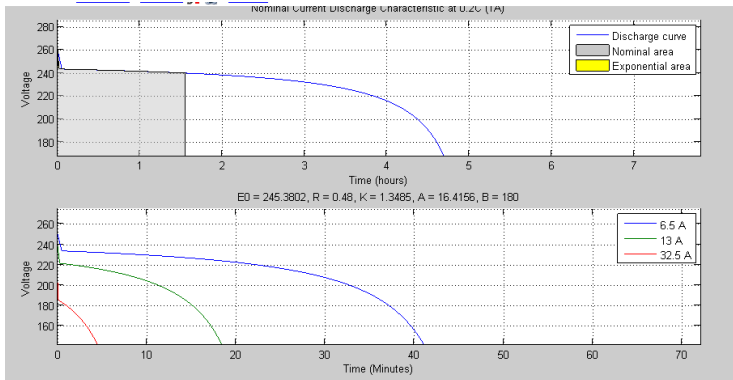
Dengan kata lain, dapat dilihat bahwa PV yang menggunakan MPPT memiliki grafik yang cenderung konstan, sedangkan yang tanpa MPPT memiliki grafik yang tidak konstan dan cenderung tidak stabil. Dengan menggunakan MPPT, daya yang dikeluarkan PV dapat dipertahankan mendekati daya maksimum dan tidak terpengaruh terhadap perubahan beban.

4.2 Desain Baterai *bidirectional*-SEPIC konverter

Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana kinerja baterai pada sistem. Pemodelan suatu baterai dapat dilakukan melalui simulasi di Matlab, dengan harapan memperoleh variabel dalam suatu pemodelan. Dalam simulasi berikut, menggunakan 20 buah baterai yang dipasang secara seri agar menghasilkan tegangan 240 volt.

Tabel 4.2 Spesifikasi Parameter Baterai yang Digunakan

Parameter	Nilai
<i>Rated Voltage</i>	12 V
<i>Rated Capacity</i>	5 Ah
<i>Internal Resistance</i>	0,06 mΩ



Gambar4.3 karakteristik pemodelan baterai pada Matlab

Setelah pemodelan baterai diperoleh, maka dilakukan simulasi dengan perubahan *State of Charge* (SOC) dan beban.

Tabel 4.3 perbandingan variasi beban dan SOC

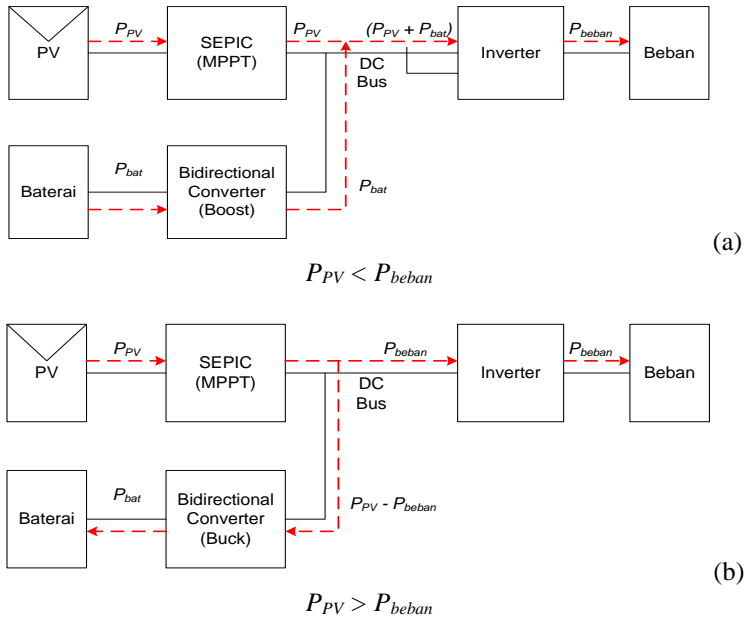
Beban	SOC 100%	SOC 80%	SOC 50%
50	1109	1109	1109
100	560	560	560
150	374	374	374
200	281	281	281

Berdasarkan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa *State Of Charge* (SOC) suatu baterai tidak berpengaruh terhadap daya *output*. Sedangkan saat di beri variasi beban, maka daya *output* akan berubah.

4.3 Simulasi Sistem Saat Kondisi Statis

Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui kinerja dan keefektifan sistem sesuai kondisi cuaca, kapasitas baterai, dan kebutuhan beban. Detail mode operasi sistem telah dijabarkan pada Bab 3. Pada bagian ini, juga diperlihatkan terlebih dahulu ilustrasi aliran

daya pada masing-masing kondisi pada Gambar 4.4 untuk mempermudah analisis. Pembahasan ini dibagi menjadi dua bagian besar, yaitu kondisi saat kebutuhan beban melebihi daya maksimum *photovoltaic* (PV) dan kondisi saat kebutuhan beban di bawah daya maksimum *photovoltaic* (PV). Selain itu, dilihat pula bentuk serta THD tegangan dan arus output beban.



Gambar 4.4 Ilustrasi aliran daya pada masing-masing kondisi

4.3.1 Daya Beban melebihi Daya PV ($P_{Beban} > P_{PV}$)

Pada simulasi ini, beban yang digunakan adalah 1000 Watt. Baterai dikondisikan dalam keadaan full charge atau dengan kata lain mempunyai SOC 100%. Hasil simulasi dilihat saat sistem telah bekerja dalam kondisi steady-state. Agar mendapatkan hasil yang sesuai, simulasi dilakukan dengan menggunakan 2 variasi intensitas cahaya matahari, yaitu 800 W/m^2 dan 500 W/m^2 Suhu di sekitar PV diasumsikan konstan 25°C .

Hasil simulasi pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 menunjukkan besar aliran daya pada sistem. Daya yang dikeluarkan PV adalah daya maksimum saat intensitas cahaya 800 W/m² dan 500 W/m²

Tabel 4.4 Aliran daya pada sistem saat Kondisi $P_{Beban} > P_{PV}$ dan intensitas cahaya 800 W/m²

Bagian	Daya (Watt)	
	PV 1	PV 2
PV Array	398.98	994.26
Baterai	102.51	56.09
Beban	499.59	999.2

Tabel 4.5 Aliran daya pada sistem saat Kondisi $P_{Beban} > P_{PV}$ dan intensitas cahaya 500 W/m²

Bagian	Daya (Watt)	
	PV 1	PV 2
PV Array	250.37	587.26
Baterai	254.91	418.01
Beban	499.58	997.55

4.3.2 Daya Beban di bawah Daya PV ($P_{beban} < P_{PV}$)

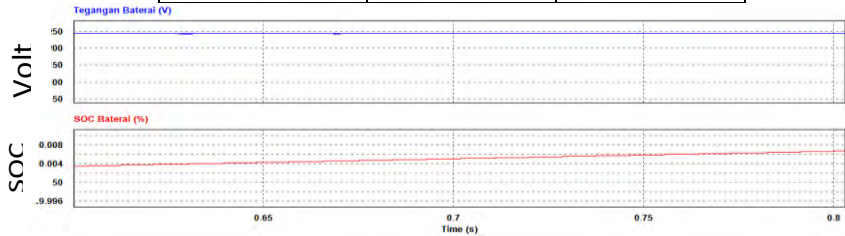
Beban yang digunakan pada simulasi ini adalah 500 Watt. Sedangkan baterai dikondisikan menjadi 2, yaitu dalam keadaan 50% terisi dan dalam keadaan mendekati penuh (99.9%). Hal ini dilakukan untuk mengetahui respon sistem ketika baterai telah penuh agar tidak ada lagi arus yang mengalir menuju baterai. Kondisi cuaca diasumsikan mempunyai intensitas cahaya konstan 1000 W/m² dengan suhu 25 °C.

4.3.2.1 SOC Baterai 50%

Simulasi dilakukan dengan membuat baterai telah terisi 50%. Aliran daya sistem ditunjukkan oleh Tabel 4.6. Nilai daya baterai yang negatif menunjukkan baterai dalam kondisi charging. Daya tersebut merupakan daya PV yang berlebih ketika kebutuhan beban telah terpenuhi.

Tabel 4.6 Aliran daya pada sistem saat Kondisi $P_{Beban} < P_{PV}$ dan intensitas cahaya 1000 W/m^2 saat SOC 50% dan 99,9%

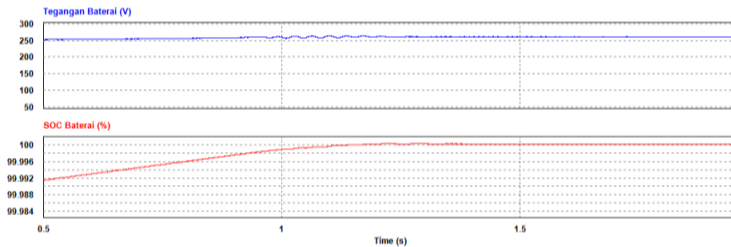
Bagian	Daya (Watt)	
	PV 1	PV 2
PV Array	500.91	994.26
Baterai	-147.51	-251.03
Beban	347.60	746.02



Gambar 4.5 Bentuk tegangan dan SOC baterai saat kondisi $P_{Beban} < P_{PV}$ dan SOC baterai 50%

Gambar 4.5 menunjukkan SOC baterai yang meningkat akibat proses charging pada baterai. Hal ini juga berdampak pada tegangan baterai yang menjadi semakin tinggi. Linearisasi kenaikan tegangan dan SOC baterai setiap detik adalah 0.7 V/s dan $16 \times 10^{-3} \text{ \%/s}$.

4.3.2.2 SOC Baterai 99.9%



Gambar 4.6 Bentuk tegangan dan SOC baterai saat kondisi $P_{Beban} < P_{PV}$ dan SOC baterai 99.99%

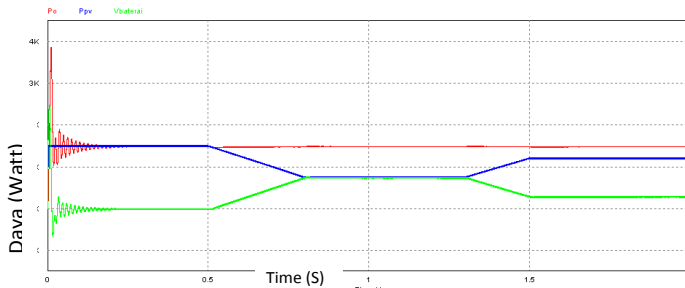
Pada simulasi ini, SOC baterai diubah menjadi 99.99% dengan tujuan melihat respon kerja sistem terhadap kondisi baterai. Tampak pada gambar bahwa nilai SOC akan naik hingga maksimal 100. Hal ini dikarenakan kapasitas baterai yang telah penuh sehingga tegangan baterai telah mencapai titik overvoltage yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Pada kondisi ini, tidak ada lagi kenaikan tegangan maupun SOC baterai.

4.4 Simulasi Pada beban transient

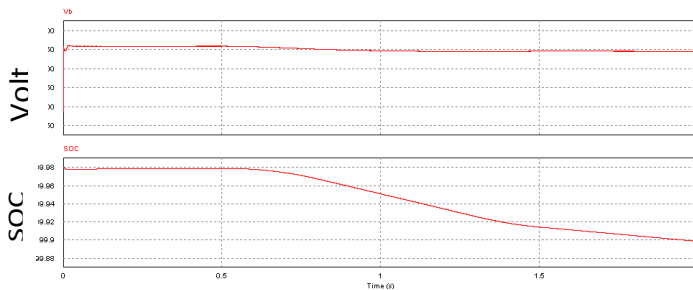
Tujuan simulasi ini adalah mengetahui respon sistem ketika terjadi perubahan kebutuhan beban ataupun perubahan kondisi cuaca dalam satu waktu. Simulasi dibagi menjadi 2, yaitu variasi kebutuhan beban dan variasi intensitas cahaya. Analisis yang dilakukan adalah kesesuaian mode charge dan discharge baterai, kestabilan tegangan DC bus dan tegangan output, serta kontrol daya PV.

4.4.1 Variasi Intensitas Cahaya dengan Daya Beban Konstan

Simulasi dilakukan dengan menggunakan intensitas cahaya matahari yang divariasikan dalam satu waktu. Variasinya antara lain 1000 W/m^2 , 500 W/m^2 , dan 800 W/m^2 , sedangkan suhu sekitar PV dibuat tetap 25°C . Beban yang digunakan mempunyai rating 1500 Watt dan baterai telah terisi sebesar 90% dari kapasitasnya.



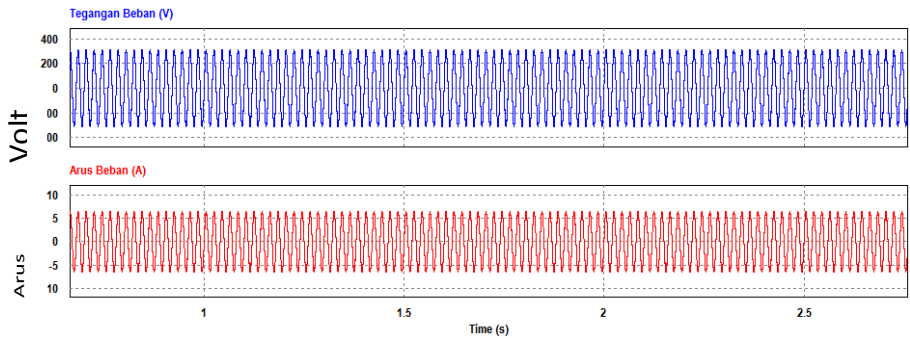
Gambar 4.7 Aliran uaya pada sistem saat kondisi intensitas cahaya bervariasi



Gambar 4.8 Bentuk tegangan dan SOC baterai saat kondisi intensitas cahaya bervariasi

Tabel 4.7 Daya PV, baterai, dan beban pada intensitas cahaya yang bervariasi

Intensitas Cahaya (W/m ²)	Daya 1 (Watt)		Daya 2 (Watt)		Beban (Watt)
	PV	Baterai	PV	Baterai	
1000	499.7	0.7	1011.9	0.5	1501.1
500	249.35	246.7	498.7	493.4	1499.01
800	400.56	95.6	801.13	191.3	1495.7



Gambar 4.9 Bentuk tegangan dan arus beban saat kondisi intensitas cahaya bervariasi

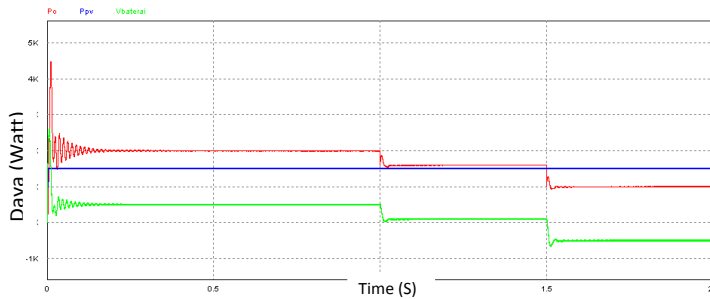
Hasil simulasi pada Gambar 4.9 menunjukkan bahwa dalam kondisi intensitas cahaya yang bervariasi, beban tetap tersuplai sesuai kebutuhan daya beban. Besar daya pada PV, baterai, dan beban dirangkum pada Tabel 4.7. Selama kondisi simulasi ini, baterai belum terisi penuh (Gambar 4.8) sehingga bagian PV tetap bekerja dalam kondisi MPPT.

Bentuk tegangan dan arus beban tetap terjaga konstan, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.9.

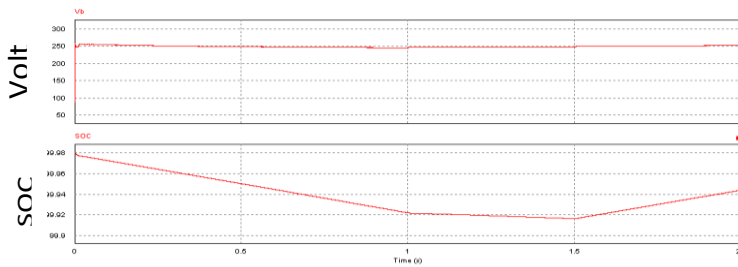
4.3.2 Variasi Kebutuhan Daya Beban dengan Intensitas Cahaya Konstan

Pada simulasi ini, kebutuhan daya beban divariasikan menjadi 3, yaitu 2000 Watt, 1000 Watt, dan 1500 Watt. Intensitas cahaya matahari dan suhu dibuat tetap 1000 W/m^2 dan 25°C . Baterai diasumsikan telah terisi penuh (SOC 100%).

Gambar 4.10 menunjukkan aliran daya hasil simulasi. Daya beban yang bervariasi mengakibatkan daya baterai juga bervariasi, bernilai positif ketika *discharging* dan negatif ketika *charging*. Selain itu, perubahan beban juga berpengaruh pada tegangan dan SOC baterai, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.11. Nilai – nilai aliran daya pada kondisi beban yang bervariasi ditunjukkan pada Tabel 4.8.



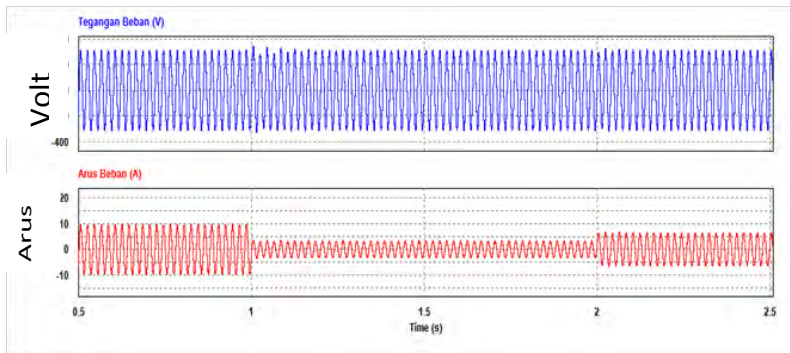
Gambar 4.10 Aliran daya pada sistem saat kondisi kebutuhan beban bervariasi



Gambar 4.11 Bentuk tegangan dan SOC baterai saat kondisi kebutuhan beban bervariasi

Tabel 4.8 Besar aliran daya pada kondisi beban bervariasi

Intensitas Cahaya (W/m^2)	Daya 1 (Watt)		Daya 2 (Watt)		Beban (Watt)
	PV	Baterai	PV	Baterai	
1000	499.7	247.8	1011.9	250.01	1997.98
1000	499.7	46.2	1001.9	50.11	1599.55
1000	499.7	-250.11	998.7	-245.98	1000.98



Gambar 4.12 Bentuk tegangan dan arus beban saat kondisi beban bervariasi

Bentuk dan nilai tegangan tetap terjaga konstan meskipun terdapat sedikit kondisi transien saat terjadi perubahan beban, sedangkan nilai arus beban berubah tergantung besarnya beban, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.12.

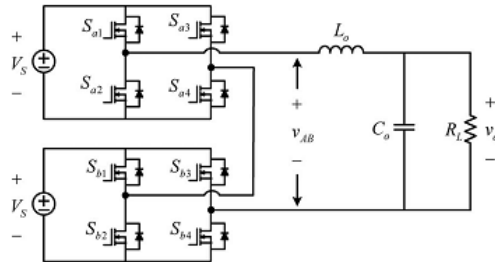
4.5 Modifikasi rangkaian Multilevel Inverter 6 Switch

Tujuan simulasi ini adalah untuk memodifikasi rangkaian *CCHB Inverter 8 Switch* menjadi *Multilevel Inverter 6 Switch*. Pada gambar 4. Tampak rangkaian CCHB Inverter. Untuk membantu mempermudah dalam memecahkan masalah yang disebabkan oleh kerumitan daya dan sirkuit control yang kompleks untuk *multilevel inverter* yang konvensional. Topologi multilevel inverter satu fasa yang baru, tampak pada gambar 3.

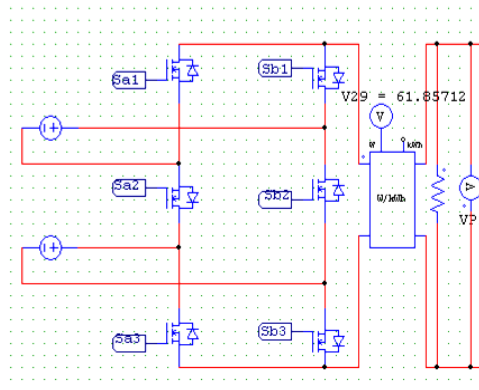
Berdasarkan pada gambar, harus diasumsikan bahwa, dalam konfigurasi, dua kapasitor sebagai rangkaian pembagi terhubung langsung ke dc bus, dan semua dikombinasikan sebagai siklus keluaran. Tegangan penyeimbang antara dua kapasitor dikontrol secara otomatis oleh *konverter* penaik tegangan. Lalu, dapat kita asumsikan $V_{s1}=V_{s2}=V_s$.

Topologi ini memiliki 6 *switch*, lebih sedikit 2 *switch* dibandingkan dengan CCHB yang memiliki 8 *switch*, yang secara drastic mengurangi sirkuit daya yang kompleks dan memperoleh desain yang sederhana. Skema pengaturan PWM *phase disposition*(PD) dikenalkan untuk merubah sinyal *switching* dan untuk menghasilkan

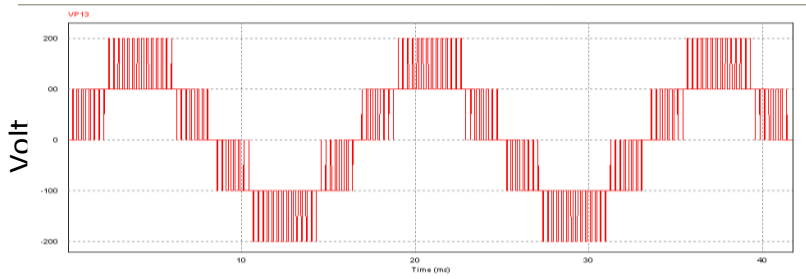
lima level tegangan keluaran : 0, V_s , $2V_s$, $-V_s$, dan $-2V_s$. Topologi inverter ini menggunakan dua sinyal pembawa sinyal dan satu sinyal referensi untuk *switch* sinyal PWM. Hasil Multilevel Inverter ini tampak pada gambar 4.15 dimana hasil *output* tegangan sesuai dengan yang diharapkan.



Gambar 4.13 Desain CCHB Inverter



Gambar 4.14 Desain Multilevel Inverter



Gambar 4.15 Output Multilevel Inverter

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan simulasi yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa *multilevel inveter* dapat digunakan untuk beberapa sumber seperti photovoltaic (*PV*) dan baterai. Hal ini disebabkan *multilevel inverter* memiliki rasio *gain* yang tinggi untuk meningkatkan tegangan dengan nilai *duty cycle* yang kecil. *Multilevel inverter* pada penelitian ini dapat meningkatkan tegangan *PV* sebesar 150 Volt menjadi 450 Volt dengan *duty cycle* 0.78. Hal ini bertujuan untuk memenuhi kebutuhan tegangan *DC-Link* pada sistem. Penggunaan MPPT kontrol pada sistem bertujuan untuk memaksimalkan daya keluaran *PV* sehingga berapapun daya yang dihasilkan oleh *PV* akan diserap sistem secara maksimal (98%).

Penggunaan beberapa kontroler pada sistem dalam tugas akhir ini bertujuan agar sistem dapat memaksimalkan daya yang dihasilkan modul *PV* untuk beban. Hal ini dapat dibuktikan saat *irradiant* maksimum (1000 W/m^2), didapat daya output 250 watt.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk tugas akhir ini adalah :

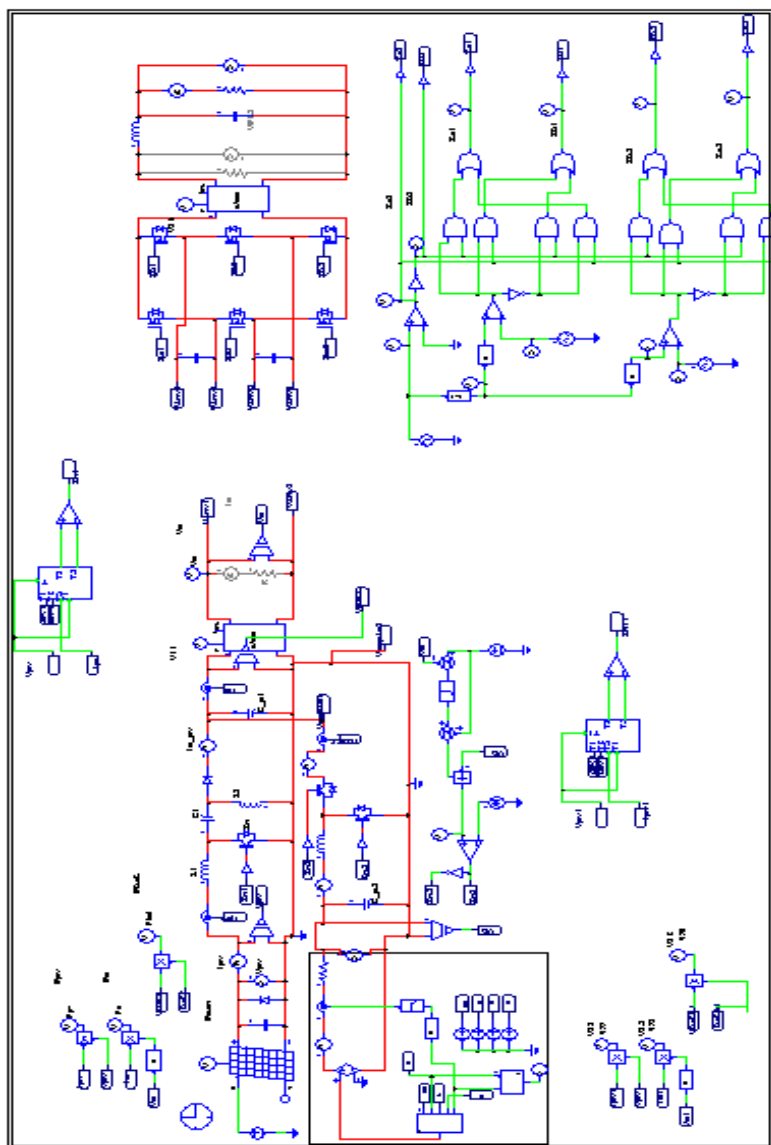
1. Diharapkan kedepannya dapat dilakukan penelitian menggunakan metode MPPT lain seperti *hillclimbing*, *fuzzy logic* dan sebagainya.
2. Diharapkan kedepannya hasil simulasi dapat lebih diperbaiki dan dapat diimplementasikan pada *plant* secara nyata.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. J. Chiang, Hsin-Jang Shieh, and Ming-Chieh Chen, “*Modeling and Control of PV Charger System With SEPIC Converter*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 11, Nopember 2009.
- [2] Mumadi Veerachary, “*Two-Loop Controlled Buck-SEPIC Converter for Input Source Power Management*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, No. 99, Nopember 2011.
- [3] Slamet Riyadi dan Tjukup Marnoto, “*Design of DC-AC Inverter LC Filter for Solar Power System*”, Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan”, 2006.
- [4] Fei Ding, Peng Li, Bibin Huang, Fei Gao, Chengdi Ding, Chengshan Wang, “*Modeling and Simulation of Grid-connected Hybrid Photovoltaic/Battery Distributed Generation System*”, International Conference on Electricity Distribution, China, 2010.
- [5] Dedet C. Riawan, Vita L. Budiharto Putri, and Febby Widiyanto, “*Desain dan Simulasi Boost Converter Tiga Tingkat dengan Kontrol MPPT pada Sistem Panel Surya untuk Pembangkit Tersebar*”, JURNAL TEKNIK POMITS Vol. 1, No. 1, 1-6 (2013)
- [6] Ahmad El Khateb, Nasrudin Abdul Rahim, and Jeyraj Selvaraj, “*Fuzzy Logic Controller for MPPT SEPIC Converter and PV Single Phase Inverter*”, IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, Malaysia, September 2011.
- [7] David S. Morales, “*Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic applications*”, Thesis of Master of Science in Technology, Aalto University.
- [8] Yuan-Chuan Liu and Yaow-Ming Chen, “*A Systematic Approach to Synthesizing Multi-Input DC/DC Converters*”, Power Electronics Specialists Conference, 2007
- [9] Ahmad El Khateb, Nasrudin Abdul Rahim, and Jeyraj Selvaraj, “*Fuzzy Logic Controller for MPPT SEPIC Converter and PV Single Phase Inverter*”, IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, Malaysia, September 2011.
- [10] Timothy L. Skavarenina, “*The Power Electronics Handbook – Industrial Electronics Series*”, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA
- [11] M. H. Rashid, “*Power Electronics Handbook*”, Elsevier Inc 2007

- [12] Daniel W. Hart, *Power Electronics*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011.
- [13] Mitsubishi electric, “*PV-MLU250HC 250 Watt Photovoltaic Module*”, 2015.



Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Damatya Prayogo dilahirkan di Surabaya, tanggal 7 Oktober 1988. Penulis adalah putra ke-1 dari pasangan Besar Suripno dan Sumijatiningsih. Penulis memulai jenjang pendidikan di SDN Kaliasin III Surabaya, SMP Negeri 6 Surabaya, dan SMA Negeri 2 Surabaya hingga lulus pada tahun 2006. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan Diploma 3 dan diterima di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada Jurusan Teknik Elektro, dan kemudian mengambil bidang studi Elektro industri. Pada Tahun 2011 penulis melanjutkan kuliah Lintas Jalur Sarjana 1 di Institut yang sama. Sejak awal kuliah lintas jalur, penulis melakukannya bersama kerja. Akhirnya penulis kembali kuliah untuk melanjutkan Tugas Akhirnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan